



Faculté de génie

Département de génie électrique et de génie informatique

Institut interdisciplinaire d'innovation technologique - 3IT

Cellules solaires multi-jonctions dupliquées pour le photovoltaïque à très haute concentration

Thèse de doctorat

Spécialité : génie électrique

Mohamed EL-GAHOUCI

Membres du jury

Prof. Abderraouf BOUCHERIF (Directeur)

Département de génie mécanique
Faculté de génie
Université de Sherbrooke

Prof. Simon FAFARD (Directeur)

Département de génie électrique et de génie informatique
Faculté de génie
Université de Sherbrooke

Prof. Richard ARÈS (Co-directeur)

Département de génie mécanique
Faculté de génie
Université de Sherbrooke

Prof. Maxime DARNON (Rapporteur)

Département de génie électrique
Faculté de génie
Université de Sherbrooke

Prof. Maxime DARNON (Évaluateur interne)

Département de génie électrique
Faculté de génie
Université de Sherbrooke

Prof. Stéphane COLLIN (Évaluateur externe)

Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies (C2N, CNRS)
Université Paris-Saclay

La source et l'essence de notre richesse sont données dans le rayonnement du soleil, qui dispense l'énergie – la richesse – sans contrepartie. Le soleil donne sans jamais recevoir...
Georges Bataille

RÉSUMÉ

L'électricité d'origine photovoltaïque constituera une composante majeure des apports énergétiques (domestiques, industriels et spatiaux) dans les prochaines années [1]. Les cellules solaires multi-jonctions III-V sous concentration solaire détiennent actuellement les records de taux de conversion de la lumière en électricité ($>47\%$ [2]). Le photovoltaïque concentré (CPV) a de nombreux avantages : (i) très faible empreinte carbone, (ii) utilise moins de surface et (iii) permet de créer des emplois locaux particulièrement intéressants pour les pays en voie de développement. Afin de rendre le CPV compétitif par rapport aux autres technologies, en particulier celles à base de silicium dont le coût ne cesse de baisser, il faut opérer efficacement au-delà du millier de soleils. Cependant, au fur et à mesure que la lumière devient concentrée, la cellule solaire délivre plus de courant (I), ce qui entraîne d'autres effets indésirables, comme par exemple les pertes résistives et le surchauffage.

Dans cette thèse, nous proposons une nouvelle approche de conception des cellules solaires, qui consiste à dupliquer les sous-cellules de même gap en deux ou plusieurs sous-jonctions de gaps identiques, connectées électriquement et optiquement en série. Ainsi, le dispositif fonctionne à des tensions plus élevées et il en résulte un courant plus faible, ce qui contribue à une réduction substantielle des pertes résistives proportionnelles à I^2 . Nous avons démontré, pour la première fois, qu'une telle approche est très performante pour améliorer le rendement avec l'augmentation du facteur de concentration, ouvrant de nouveaux horizons de solution pour la minimisation des coûts de l'énergie. En premier lieu, plusieurs architectures des cellules dupliquées à base de GaAs et de triple-jonction $\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}/\text{GaAs}/\text{Ge}$ sont simulées avec une approche multiphysique pour étudier leurs performances sur une large gamme de concentrations. On a ainsi identifié les structures permettant de minimiser le coût de l'électricité grâce à une maximisation du facteur de concentration. Cette étude a montré qu'une réduction de plus de 20% du coût de l'électricité est atteignable par rapport à un système de référence. Ensuite, le concept est validé expérimentalement par une cellule à trois jonctions de GaAs dupliquées. Une simulation calibrée par éléments finis, à l'aide du logiciel Silvaco Atlas, est utilisée pour étudier les facteurs de mérite des cellules dupliquées à très hautes concentrations (>1000 soleils). Nous avons commencé par l'optimisation des jonctions tunnel servant d'interconnexions électriques dans les cellules dupliquées pour déterminer les plages de dopage où elles ne seront pas limitantes. Pour cela, un modèle de transport non local est utilisé pour simuler les jonctions suivantes (p^{++}/n^{++}): $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As} / \text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}$, $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As} / \text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ et $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As} / \text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$. À la suite de cette optimisation, plusieurs cellules dupliquées (2xGaAs, 3xGaAs et 2xInGaP/2xGaAs) sont simulées. Les résultats confirment que l'augmentation des sous-jonctions améliore le rendement des cellules solaires à hautes concentrations. Typiquement, des améliorations de l'efficacité absolue d'environ 2%, 3.5% et 4% sont atteintes pour 2xGaAs, 3xGaAs et 2x $\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}/2\text{xGaAs}$, respectivement.

Le modèle économique indique qu'une réduction substantielle du coût (jusqu'à 30%) serait possible en implémentant cette technologie dans les panneaux solaires terrestres et spatiaux, permettant ainsi de rendre le CPV très compétitif, par rapport aux systèmes commerciaux FLATCON CPV opérant à des concentrations maximales d'environ 500 soleils [3].

Mots-clés: cellule solaire III-V, cellules solaires dupliquées, concentration, pertes résistives, limite thermodynamique, simulation, Silvaco Atlas, jonction tunnel.

ABSTRACT

Photovoltaic electricity will be a major component of energy production (domestic, industrial and space applications) during upcoming years [1]. Multi-junction III-V solar cells under solar concentration currently hold the conversion efficiency records ($>47\%$ [2]). Concentrated photovoltaic (CPV) has many advantages: (i) very low carbon footprint (ii) uses less surface area and (iii) creates local jobs that are particularly interesting for developing countries. In order to make CPV competitive with other technologies, in particular those based on silicon, the cost of which is constantly falling, it is necessary to operate efficiently beyond a thousand suns. However, as the light becomes concentrated, the solar cell delivers more current (I), leading to other undesirable effects such as resistive losses and overheating.

In this thesis, we propose a new approach to solar cell design, which consists of duplicating sub-cells with the same gap into two or more identical gap sub-junctions, electrically and optically connected in series. Thus, the device operates at higher voltages and delivers a lower current, which will contribute to a substantial reduction of resistive losses proportional to I^2 . We demonstrated, for the first time, that such an approach is highly effective in improving solar cells efficiency as the concentration factor increases, opening up new solutions for minimizing energy costs. Firstly, several designs of GaAs and $\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}/\text{GaAs}/\text{Ge}$ triple-junction duplicated cells were simulated with a multiphysics approach, to study their performance over a wide range of concentrations and identify the best structures. This will minimize the cost of electricity through maximizing the concentration factor. The studies carried out in the context of this work have revealed that a reduction of more than 20% in the cost of electricity is attainable compared to a reference system. The feasibility of implementing the duplicated junction solar cells was experimentally validated by a cell with three duplicated GaAs junctions. A calibrated finite element simulation, using Silvaco Atlas software, was employed to study the factors of merit of the duplicated cells at high concentrations (>1000 suns). The process began by optimizing the tunnel junctions, serving as electrical interconnections in the duplicated cells, to determine the doping ranges where they will not be a limiting factor anymore. For such a purpose, a non-local transport model was used to simulate the following multijunction structures (p++/n++): $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As} / \text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}$, $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As} / \text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ and $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As} / \text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$. Following this optimization, several duplicated cells (2xGaAs, 3xGaAs and 2xInGaP/2xGaAs) were simulated for determining the layer thicknesses and related doping concentration. The outcomes of this thesis confirm that the increase in sub-connections improves the efficiency of solar cells at high concentrations. Typically, absolute efficiency improvements of about 2%, 3.5% and 4% were achieved for 2xGaAs, 3xGaAs and 2x $\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}/2\text{xGaAs}$, respectively.

The economic model indicates that a substantial cost reduction (up to 30%) would be possible by implementing this technology in terrestrial and space solar panels, thus making CPV very competitive, compared to commercial FLATCON CPV systems operating at maximum concentrations of about 500 suns [3].

Keywords: III-V solar cells, duplicated solar cells, concentration, resistive losses, thermodynamic limit, simulation, Silvaco Atlas, tunnel junction.

REMERCIEMENTS

Cette thèse s'est déroulée à l'Institut Interdisciplinaire d'Innovations Technologiques (3IT), à l'université de Sherbrooke, institut dirigé par le Pr. Richard ARÈS que je remercie particulièrement pour son accueil et sa sympathie. Une thèse est avant tout une bonne opportunité pour des rencontres et des interactions humaines avec des personnes inspirantes et motivantes. Je tiens à remercier toutes les personnes avec qui j'ai eu la chance de travailler ou collaborer au sein du 3IT.

Je remercie sincèrement mes directeurs de thèse, Pr. Abderraouf BOUCHERIF, Pr. Richard ARÈS et Pr. Simon FAFARD, pour leur encadrement tout au long de mon doctorat.

Abderraouf, ta disponibilité, tes expériences, ton soutien et ton enthousiasme m'ont aidé énormément au cours de cette thèse. Richard, ta vision scientifique, tes idées très innovantes et ta capacité de me mettre sur la bonne voie m'ont permis de voir les choses autrement et progresser dans mon travail. Simon, ton expertise dans le domaine, ta disponibilité et ta rigueur scientifique m'ont permis de mener à bien ce travail de thèse.

Mes sincères remerciements aussi à Pr. Maxime DARNON, Pr. Denis MACHON et Pr. Stéphane COLLIN d'avoir accepté de faire partie du jury de cette thèse, d'avoir pris le temps de lire ce manuscrit ainsi que les remarques très pertinentes qui m'ont aidé à améliorer la qualité du mon document.

Je remercie le postdoctorant Mohammad REZA AZIZIYAN ; mon mentor durant la thèse ; pour son aide précieuse durant la rédaction de thèse et des articles scientifiques. Sa disponibilité est très appréciée. Je tiens à remercier également Ionela-Roxana ARVINTE et Bouraoui ILAHI pour les discussions scientifiques et le partage des connaissances.

Gros remerciements à tous mes collègues avec qui j'ai eu la chance de travailler auteur du réacteur d'épitaxie CBE; Mourad JELLITE qui m'a guidé lors de mes premiers pas en salle d'épitaxie (LCSM) et en salle blanche (LNN), Thierno Mamoudou DIALLO et Alex Brice POUNGOUE MBEUNMI pour les discussions scientifiques et la collaboration. Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans l'aide et l'assistance de Hubert PELLETIER et Guillaume BERTRAND que je tiens à les remercier pour le sacré travail qu'ils font pour faire rayonner le 3IT. Je remercie également l'ensemble des ingénieurs, techniciens et professionnels de recherches des plateformes LNN et LCSM. Continuez à faire rayonner le 3IT !

Je remercie également Mme Gwénaëlle HAMON de m'avoir aidé dans les processus de fabrication en salle blanche et Mr. Artur TURALA de m'avoir formé sur les montages de mesures électriques afin de caractériser mes cellules solaires.

Dernièrement, je tiens bien entendu à remercier mes parents, ma sœur et mes frères pour leur soutien sans limites tout au long des quatre années, toujours présents pour parler, que ce soit dans les bons, mais surtout mauvais passages de la thèse.

Merci à tous(tes) et bonne lecture,

Mohamed

CONFÉRENCES ET PUBLICATIONS

Les recherches discutées dans cette thèse ont été soumises et publiées dans des revues et conférences internationales. Les contributions scientifiques issues de ces travaux sont énumérées ci-dessous.

- “Cost-effective energy harvesting at ultra-high concentration with duplicated concentrated photovoltaic solar cells”, **M. El-Gahouchi**, M. R. Aziziyan, R. Arès, S. Fafard, and A. Boucherif, *Energy Sci. Eng.*, no. January, pp. 1–11, 2020. (Article journal publié).
- “Optimized Duplicated-Junction Solar Cells: An Innovative Approach for Energy Harvesting at Ultra-High Concentrations”, **M. El-Gahouchi**, M. R. Aziziyan, R. Arès, and A. Boucherif. 16th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-16). (Article de conférence publiée).
- “Duplicated design to further improve III-V solar cell efficiency at ultra-high concentration factors (>1000 suns)”, **M. El-Gahouchi**, M. R. Aziziyan, R. Arvinte, R. Arès, and A. Boucherif. The Canadian Semiconductor Science and Technology Conference (CSSTC 19), July 28 to August 1, 2019 at Saskatoon, SK, Canada. (Prix du meilleur poster).

Autres contributions

- “Direct growth of GaAs solar cells on Si substrate via mesoporous Si buffer”, A. B. Pougoué Mbeunmi, **M. El-Gahouchi**, R. Arvinte, A. Jaouad, R. Cheriton, M. Wilkins, C. E. Valdivia, K. Hinzer, S. Fafard, V. Aimez, R. Arès, and A. Boucherif. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 217 (2020) 110641. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110641>.
- “Hybrid epitaxy technique for the growth of high-quality AlInAs and GaInAs layers on InP substrates”, Thierno Mamoudou Diallo, Alex Brice Pougoué Mbeunmi, **Mohamed El-Gahouchi**, Mourad Jellite, Roxana Arvinte, Mohammad Reza Aziziyan, Richard Arès, Simon Fafard and Abderraouf Boucherif. *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 37, no. 3, p. 031208, 2019, doi: 10.1116/1.5088962.

TABLE DE MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	iv
ABSTRACT.....	v
REMERCIEMENTS.....	vi
CONFÉRENCES ET PUBLICATIONS.....	vii
LISTE DE FIGURES.....	xi
LISTE DE TABLEAUX	xv
LISTE DES ACRONYMES	xvi
Chapitre 1. Introduction	1
1.1 Mise en contexte et problématique	1
1.2 Définition du projet de recherche	4
1.3 Objectifs du projet	6
1.4 Contributions originales	7
1.5 Organisation du document.....	7
Chapitre 2. État de l’art	9
2.1 Cellules solaires multi-jonction	9
2.1.1 Introduction	9
2.1.2 Intérêt des cellules solaires multi-jonction	10
2.1.3 Industrie des cellules solaires multi-jonction	12
2.2 Cellules MJ sous concentration solaire	13
2.2.1 Structure d’une sous-cellule et facteurs de mérite	13
2.2.2 Mécanismes de pertes dans une cellule solaire	16
2.2.3 Pertes résistives dans une cellule MJ	19
2.2.4 Impact de la concentration solaire.....	21
2.3 Approches alternatives pour la minimisation des pertes résistives dans les cellules	
MJ	24
2.3.1 Optimisation de la grille métallique	25
2.3.2 Jonctions tunnel à faible résistance	26
2.3.3 Dimensions des cellules solaires	28

2.4	Vers une nouvelle approche de conception pour le CPV : cellules solaires à jonctions dupliquées	29
2.4.1	Description de l'approche	29
2.4.2	Cellule solaire à jonctions dupliquées Vs cellule MJ	33
Chapitre 3.	Conception des cellules solaires dupliquées et leur coût relatif	35
3.1	Avant-propos	35
3.2	Cost-effective energy harvesting at ultra-high concentration with duplicated concentrated photovoltaic solar cells.....	36
3.2.1	Abstract	36
3.2.2	Introduction	37
3.2.3	Modeling details	40
3.2.4	Material considerations	43
3.2.5	Results and discussion.....	45
3.2.6	Conclusion.....	53
3.2.7	Acknowledgements	54
3.2.8	Supporting information: Above five-time duplication of single-junction GaAs and three-junction GaInP/GaAs/Ge	54
Chapitre 4.	Validation du concept et simulation d'une cellule solaire dupliquée à trois jonctions de GaAs	57
4.1	Avant-propos	57
4.2	Optimized duplicated-junction solar cells: an innovative approach for energy harvesting at ultra-high concentrations.....	58
4.2.1	Abstract	58
4.2.2	Introduction	58
4.2.3	Design and J-V characterization of 3xGaAs DJSC.....	59
4.2.4	Simulation of 3xGaAs device	61
4.2.5	Conclusions and future works	65
4.2.6	Acknowledgments	66
Chapitre 5.	Simulation des cellules solaires MJ dupliquées sous concentration solaire par Silvaco Atlas	67
5.1	Simulation numérique par Silvaco	67
5.1.1	Simulateur Atlas	68
5.1.2	Équation de Boltzmann	70
5.1.3	Modèle dérive-diffusion	71
5.1.4	Modèles physiques	73

5.2	Conception des jonctions tunnel.....	78
5.2.1	Cadre théorique	78
5.2.2	Caractéristique J(V) des jonctions tunnel.....	81
5.2.3	Description des jonctions tunnel	83
5.2.4	Résultats de simulation.....	85
5.3	Cellules solaires dupliquées.....	87
5.3.1	Description	87
5.3.2	Épaisseurs des jonctions p-n	89
5.3.3	Réflectance	91
5.3.4	Paramètres physiques et calibration	92
5.3.5	Limitation par les jonctions tunnel sous concentration	95
5.3.6	Résultats	96
5.4	Conclusion du chapitre	104
Chapitre 6.	Conclusions générales et perspectives	106
6.1	Sommaire.....	106
6.2	Perspectives	108
Annexe A.	Code de simulation par Silvaco Atlas d'une cellule solaire dupliquée : cas d'une double-jonction de GaAs.....	110

LISTE DE FIGURES

Figure 1-1 : Approvisionnement total en énergie primaire par type d'énergie en 2018. Les chiffres sont extraits de [7].	1
Figure 1-2 : Parc solaire au parc d'innovation ACELP au 3IT.	3
Figure 1-3 : Représentation schématisée d'une cellule simple (a); et une cellule dupliée N fois (b).	5
Figure 2-1 : (a) Évolution d'irradiance spectrale par une cellule à simple jonction; (b) l'évolution de l'efficacité en fonction de l'énergie de bande interdite.	10
Figure 2-2 : Évolution d'irradiance spectrale par une cellule MJ InGaP/GaAs/Ge.	11
Figure 2-3 : Efficacité théorique maximale des cellules MJ à un soleil [36].	12
Figure 2-4 : (a) Structure typique d'une sous-cellule de la cellule MJ; (b) Diagramme de bandes en équilibre thermodynamique d'une sous-cellule correspondant à la structure présentée.	14
Figure 2-5 : Caractéristique I(V) typique d'une sous-cellule solaire typique. Inset : modèle électrique simple pour une cellule solaire réelle.	16
Figure 2-6 : Mécanisme de génération et de pertes par : (1) perte par thermalisation (2), perte dans la jonction par effet Joule (3), perte par recombinaisons volumiques (4), perte par recombinaisons surfaciques et (5) perte dans les contacts (chaleur de Peltier).	17
Figure 2-7 : Les différentes contributions de la résistance série dans une sous-cellule solaire [44].	19
Figure 2-8 : Les paramètres d'une cellule triple-jonction GaInP/GaAs/Ge calibrée [17].	22
Figure 2-9 : Efficacité de la cellule GaInP/GaAs/Ge en fonction de la résistance de grille métallique. Un facteur d'ombrage de 3% est considéré [17].	23
Figure 2-10 : Figures de mérite d'une cellule triple jonction GaInP/GaAs/Ge en fonction de concentration pour différents empilements métalliques [18].	26
Figure 2-11 : (a) Diagramme de bande en équilibre thermodynamique d'une jonction tunnel p+/p++/n++/p+ et les niveaux de Fermi; (b) la courbe J-V typique d'une jonction tunnel [66].	27

Figure 2-12 : (a) Pic du courant et (b) résistance série à 2000 soleils en fonction du dopage effectif. Le courant minimal requis à 2000 soleils pour une cellule triple-jonction est de l'ordre de 28 A/cm ² .	28
Figure 2-13 : (a) Évolution d'efficacité et (b) du FF, en fonction de concentration pour différentes valeurs de largeurs. La courbe est tirée du papier [71].	29
Figure 2-14 : Représentation schématique d'une cellule MJ et une cellule dupliquée (aucune échelle n'est considérée).	30
Figure 2-15 : Représentation schématique des panneaux photovoltaïques; (a) cas d'une cellule standard et (b) cas d'une structure dupliquée.	33
Figure 3-1 : Schematic representations of GaAs (a) and GaInP/GaAs/Ge (b) solar cells and their duplications that were connected in series by tunnel junctions. Dimensions are not to scale.	45
Figure 3-2 : Efficiency versus concentration curves for standard GaAs and GaInP/GaAs/Ge solar cells.	46
Figure 3-3 : Calculated efficiency for duplicated single-junction GaAs (a) and duplicated three-junction InGaP/GaAs/Ge (b).	47
Figure 3-4 : Calculated efficiency and power resistive loss for GaAs DJSCs (a) and (b), as well as, InGaP/GaAs/Ge DJSCs (c) and (d).	50
Figure 3-5 : Relative costs of the electricity produced by classical 3J, and duplicated 3xGaInP/3xGaAs/3xGe. 0%, 10%, 20% and 30% represent the fractions by which the cost C ₃ was increased each time the concentration factor is doubled.	52
Figure 3-6 : Calculated efficiency for GaAs DJSCs versus concentration factors (a) and structure (b).	55
Figure 3-7 : Calculated efficiency for GaInP/GaAs/Ge DJSCs versus concentration factor (a) and structure (b).	56
Figure 4-1 : (a) Schematic of 3xGaAs DJSC showing materials and thickness of absorption regions (not drawn to scale). (b) Current-voltage curve of 3xGaAs DJSC under one sun illumination.	60

Figure 4-2 : (a) Experimental and simulation data for the J(V) characteristic of 3xGaAs solar cells. (b) simulated energy band diagram of the metal and n-GaAs regions, at equilibrium, for two different values of front-contact resistance.....	62
Figure 4-3 : Evolution of, as a function of concentrations, (a) V_{OC} , (b) FF and (c) efficiency for single-junction and 3x-DJSC GaAs solar cells.....	65
Figure 5-1 : Outils de cœur et interactifs de Silvaco-TCAD [142].....	68
Figure 5-2 : Paramètres d'entrée et de sortie d'Atlas [142].....	69
Figure 5-3 : Équations de continuité permanentes dans une cellule solaire.....	72
Figure 5-4 : Diagramme de bandes d'une JT expliquant l'effet tunnel local et non local.	78
Figure 5-5 : Diagramme de bande de conduction d'une hétérojonction abrupte. W est la largeur de la barrière.	81
Figure 5-6 : (a) à (e) évolution du comportement de digramme de bande de la JT; (f) la caractéristique J(V). Les simulations sont effectuées par Atlas.	83
Figure 5-7 : Profil du dopage simulé d'une JT p^{++} -AlGaAs/ n^{++} -AlGaAs.....	85
Figure 5-8 : Caractéristique J(V) pour différentes valeurs de dopage; (a) $Al_{0.4}Ga_{0.6}As/In_{0.51}Ga_{0.49}P$, (b) $Al_{0.4}Ga_{0.6}As/Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ et (c) $Al_{0.7}Ga_{0.3}/Al_{0.7}Ga_{0.3}As$	86
Figure 5-9 : Résistivité intrinsèque des jonctions tunnel en fonction du dopage effectif de la jonction p^{++}/n^{++}	87
Figure 5-10 : Détails des structures dupliquées 1xGaAs et 2xGaAs, montrant l'épaisseur et le dopage. L'épaisseur de la couche d'antireflet est aussi mentionnée.	88
Figure 5-11 : Détails des structures dupliquées 1xGaInP/1xGaAs et 2xGaInP/2xGaAs.....	89
Figure 5-12 : Réflectance en fonction de la longueur d'onde pour une cellule 2xGaAs avec et sans bicouche d'antireflet SiO_2/SiN	92
Figure 5-13 : (a) Section transversale de la cellule solaire GaAs utilisée pour la calibration (extraite de [66]); (b) résultats de calibration.....	95
Figure 5-14 : Caractéristique J(V) de la cellule 2xGaAs sous différentes concentrations.....	95
Figure 5-15 : Variations des taux de photogénération à travers la cellule 1xGaAs (a) et 2xGaAs (b).....	97
Figure 5-16 : Caractéristique JV des quatre cellules solaires.....	98

Figure 5-17 : Évolution de V_{OC} et J_{SC} en fonction de concentration.	100
Figure 5-18 : Diagramme de bande de la cellule 2xGaAs montrant la séparation des niveaux de Fermi dans les deux sous-jonctions. La simulation est réalisée au point de puissance maximale, soit $V_M=1.87$ V.....	101
Figure 5-19 : Évolution de facteur de forme et efficacité des cellules solaires en fonction de concentration.....	102
Figure 5-20 : Évolution de J_{SC} et d'efficacité de la cellule 2xGaAs en fonction de : (a) l'épaisseur de la sous-jonction 1 ; (b) épaisseur d'émetteur de la sous-jonction 2. Seule la JT1 est considérée.	104

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 2-1 : Valeurs mesurées des résistances séries de la simple jonction GaAs et la triple-jonction GaInP/GaAs/Ge.	20
Tableau 2-2 : Comparaison entre les cellules MJ et dupliquées.	34
Tableau 3-1 Comparison between characteristics of real devices, provided by NREL and Fraunhofer, and simulation results reported here.	47
Tableau 5-1 : Paramètres de modélisation pour le calcul des mobilités pour différents matériaux [17], [146].	74
Tableau 5-2 : Matériaux, dopages et épaisseurs des trois JTs.....	84
Tableau 5-3 : Valeurs théoriques de courant J_{SC} à 1 soleil et épaisseur équivalent pour les deux cellules dupliquées $2xGaAs$ et $2xIn_{0.51}Ga_{0.49}P/2xGaAs$	91
Tableau 5-4 : Paramètres physiques des matériaux utilisés dans les simulations Atlas.	93
Tableau 5-5 : Valeurs de résistance série calculées à partir des courbes $J(V)$ à 1 soleil.....	98
Tableau 5-6 : Performances des cellules solaires conventionnelles et dupliquées à 1 soleil.	99
Tableau 5-7 : Valeurs d'efficacité maximale et niveau de concentration correspondant.	103

LISTE DES ACRONYMES

CPV	Concentrator Photovoltaic
UHC	Ultra-High Concentration
MJ	Multi-Jonctions
PV	PhotoVoltaïque
MJSC	Multi-Jonction Solar Cells
FLATCON	Fresnel Lens All-glass Tandem cell CONcentrator
DNI	Direct Normal Irradiance
NREL	National Renewable Energy Laboratory
VEHSA	Vertical Epitaxial HeteroStructure Architecture
SQ	Shockley–Queisser
JT	Jonction Tunnel
ZCE	Zone de Charge d'Espace
BSF	Back Surface Field

Chapitre 1. INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte et problématique

Si l'on pouvait réduire les 4.6 milliards d'années, l'âge de la Terre, à une échelle de 4.6 ans, alors l'humanité n'existerait que depuis 25 minutes et la révolution industrielle aurait commencé il y a 6 secondes. Depuis le début de cette dernière, les sources fossiles d'énergie (charbon, gaz naturel et pétrole) sont les ressources les plus consommées par l'humanité [4]. Cependant, la demande croissante de cette énergie *non renouvelable*, sa rareté et les conflits géopolitiques liés à sa présence en excès dans des zones limitées, nécessite la mise en place d'autres sources d'énergie pour répondre aux besoins économiques. Le rayonnement solaire est une source d'énergie *renouvelable* et considérée comme la source la plus intense (par exemple, 1300 kWh/m²/an en moyenne à Sherbrooke (Canada) et plus de 2000 kWh/m²/an au nord de l'Afrique [5]). À ce jour, l'électricité d'origine solaire produite par les cellules solaires photovoltaïques (PV) représente environ 1% (voir **Figure 1-1**) de la production mondiale avec une production énergétique commercialisée d'environ ~1895 TWh. Ce niveau devrait progresser jusqu'à ~1.9% d'ici 2030 [6]. Cette faible production est justifiée par le coût jugé trop élevé de l'électricité produite par les cellules solaires par rapport aux autres sources.

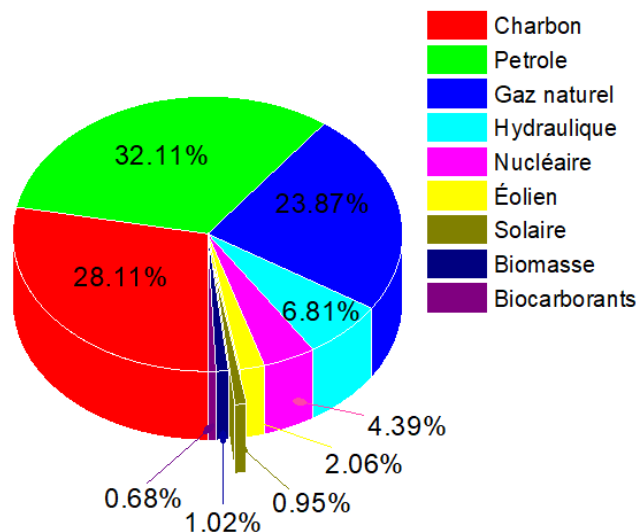


Figure 1-1 : Approvisionnement total en énergie primaire par type d'énergie en 2018. Les chiffres sont extraits de [7].

Dans un contexte global de réduction de gaz à effet de serre (GES), le Canada a lancé un plan d'électrification pour l'horizon de 2030-2050 dont les objectifs sont les suivants [8]:

- Environ 90% de l'électricité devra être produite par des sources sans émissions de GES et 30% des nouveaux véhicules vendus devront être électriques;
- Être reconnu comme un centre mondial et indispensable de développement de technologies de stockage d'énergie propre ;
- La plupart des bâtiments commerciaux et institutionnels, ainsi que les activités industrielles devront recourir aux énergies renouvelables.

Toutefois, ces objectifs passent par le développement de systèmes de production qui soient à la fois vertueux d'un point de vue environnemental et économiquement viable. Une piste consiste à utiliser le photovoltaïque à concentration ou CPV (de l'anglais *Concentrator Photovoltaics*) [9] qui est actuellement considéré une des approches les plus efficaces pour augmenter le rendement des panneaux solaires. Il consiste à concentrer la lumière sur les cellules solaires en utilisant des systèmes optiques réfractifs (lentilles de Fresnel), ou réfléchifs (miroirs) [10]; et des systèmes de suivi (*tracking*) pour aligner en tout temps les surfaces actives des cellules au point focal du système de concentration [11]. Des systèmes optiques secondaires doivent être également installés pour homogénéiser la distribution de la lumière sur la surface des cellules.

Dans un contexte local, l'université de Sherbrooke a installé en 2018 le plus grand parc solaire à concentration au Canada situé au 3IT (voir **Figure 1-2**), avec une puissance totale près d'un mégawatt dont 240 kilowatts vient du CPV. Cette technologie à concentration par des lentilles de Fresnel a été développée par l'entreprise québécoise STACE (*Saint-Augustin Canada Electric Inc.*) et fournit une efficacité du module d'environ 30% [12]. Nos travaux de recherche s'inscrivent dans la continuité des progrès du 3IT dans le domaine des énergies renouvelables y compris la conception de nouvelles structures, leur fabrication ainsi que leur installation.

Le CPV a pour objectif principal de réduire le coût des modules solaires en minimisant la quantité des matériaux semi-conducteurs utilisée [13]–[15]. Typiquement, concentrer la lumière 500 fois réduit la surface d'une cellule solaire de 1m^2 à une cellule de $(1/500)\text{m}^2$ en utilisant une lentille de 1m^2 . Le CPV réduit aussi la quantité des matériaux toxiques et permet d'éviter ainsi les pertes environnementales et économiques liées aux procédés de fabrication.



Figure 1-2 : Parc solaire au parc d'innovation ACELP au 3IT.

Malgré ces avantages, le CPV fait face cependant à plusieurs défis et sa capacité dans le marché du PV ne représente que $\sim 0.1\%$ de la capacité solaire installée dans le monde en 2018 avec ~ 5465 MWp [16]. Bien que la plupart des systèmes commerciaux à concentration fonctionnent au-delà de 300 soleils (on note X le nombre de soleils ou le facteur de concentration), le CPV n'a pas encore pleinement réalisé sa promesse de réduire le coût de l'énergie en augmentant le facteur de concentration [9]. Dans le marché présent, le CPV n'est visiblement intéressant que dans les régions à fort taux d'irradiation directe (DNI, Direct Normal Irradiance) de plus de 2000 kWh/cm²/an. Il est très peu présent dans les régions à faible et moyenne DNI. Par conséquent, des stratégies concrètes doivent être mises en place pour augmenter les performances des cellules sous concentration. On pourra ainsi les rendre moins onéreuses et garantir leurs accessibilités aux différentes populations.

Puisque le coût d'une cellule solaire représente environ $\sim 36\%$ du coût global d'un système photovoltaïque traditionnel [13], la voie prometteuse est donc d'augmenter l'efficacité des cellules solaires et le facteur de concentration sans trop impacter le coût du système optique. Cependant, les pertes résistives par effet Joule dans une cellule solaire constituent normalement la principale limitation à hautes concentrations [13], [15], [17], [18]. Puisque la puissance perdue $R_s I^2$ dépend de la résistance série (R_s) et du courant (I), deux alternatives sont possibles. La première consiste à minimiser la R_s en optimisant l'architecture de la cellule elle-même [18], [19]. Pour les cellules destinées pour les hautes concentrations, une autre alternative plus efficace consiste à réduire le courant généré par la cellule tout en augmentant la tension d'opération. Dans le but de réduire le

coût de la cellule elle-même avec la concentration, la communauté se concentre sur les cellules solaires multi-jonctions (MJ) à base des matériaux III-V. Elles sont les plus efficaces et produisent moins du courant grâce au partage du spectre solaire sur les différentes sous-cellules.

Le développement des cellules multi-jonction III-V comporte cependant diverses problématiques. En particulier, le coût relativement élevé des matériaux III-V. Des techniques innovantes ont le potentiel de réduire considérablement le coût de production telles que l'utilisation des matériaux relativement moins chers [20], [21] et l'hétéroépitaxie entre les matériaux de différents groupes (II-VI, III-V, et IV) [22]. Une autre approche complémentaire considère la réutilisation du substrat [23]. Néanmoins, il est important de souligner que la rentabilité exige l'obtention des rendements élevés. Une autre complexité est liée aux problématiques du désaccord de maille qui limite la croissance de la plupart des combinaisons optimales. La croissance métamorphique est envisagée comme une technique fiable pour augmenter le nombre de jonctions de différents gaps et donc atteindre des efficacités supérieures à 40%. Pourtant, cette technologie souffre du coût de fabrication plus élevé ainsi d'une complexité additionnelle. Ces derniers facteurs peuvent limiter la capacité de passage à la production à grande échelle [24].

1.2 Définition du projet de recherche

Malgré toutes les réalisations importantes des cellules solaires MJ III-V pour le CPV, il est nécessaire de développer de nouvelles structures qui fonctionnent efficacement à ultra hautes concentrations avec moins de pertes résistives. Ceux-ci pourraient être proposés comme une autre alternative pour réduire le coût de l'énergie solaire. Une question fondamentale se pose : comment peut-t-on développer des cellules solaires multijonctions performante à très haute concentration sans introduire de nouveaux matériaux ? Et donc, ne pas être limité par le choix de matériaux en épitaxie.

Dans cette thèse, nous proposons un nouveau concept qui consiste à dupliquer une sous-cellule (jonction p-n) donnée en deux ou plusieurs (N) jonctions p-n minces (appelées sous-jonctions) ayant la même bande interdite, créant ainsi les mêmes chemins optiques qui sont connectés électriquement en série à l'aide des jonctions tunnel. Le spectre solaire peut être ainsi réparti sur plusieurs sous-jonctions permettant d'augmenter la tension d'opération (V) tout en réduisant la densité de courant (J) délivrée par la cellule. Ceci permettra ainsi d'augmenter le rendement à des concentrations très élevées. La **Figure 1-3** illustre le cas d'une cellule dupliquée N fois ainsi que

les expressions de puissance délivrée et perdue. Nous avons considéré que la résistance série R_s reste approximativement constante lorsqu'on duplique la cellule solaire.

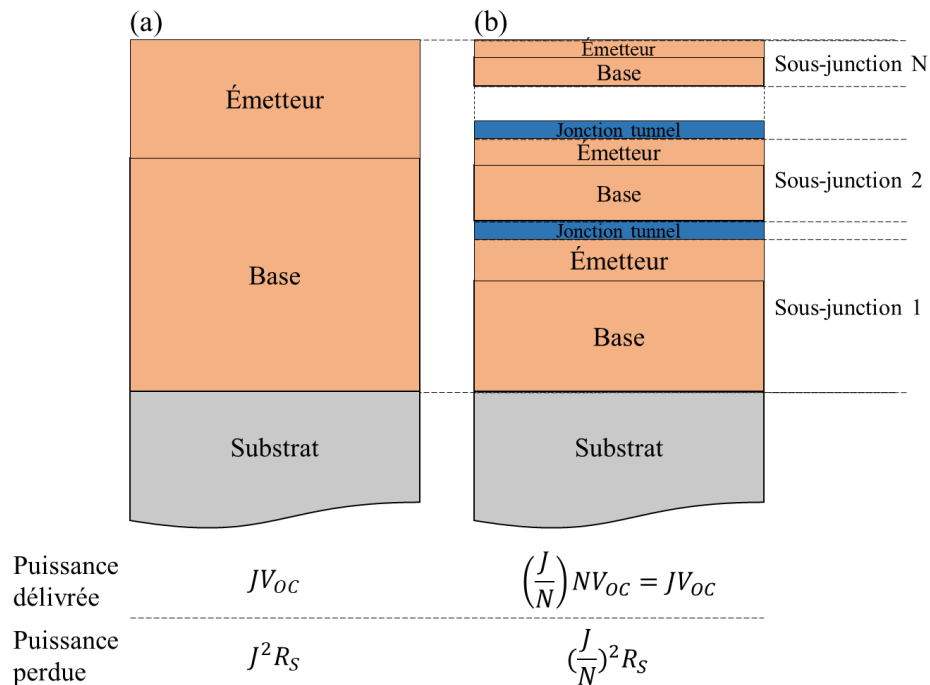


Figure 1-3 : Représentation schématique d'une cellule simple (a); et une cellule dupliquée N fois (b).

L'approche des *cellules dupliquées* présente trois avantages principaux :

- Le courant est accordé par deux méthodes : l'ajustement du nombre de sous-jonctions plutôt qu'à ajuster les bandes interdites des matériaux comme dans les cellules standards ; ou en ajustant les épaisseurs des différentes sous-jonctions durant la croissance épitaxiale.
- Aucune contrainte concernant l'incompatibilité des paramètres de mailles, car les sous-cellules dupliquées sont constituées du même matériau.
- La conception s'applique aux cellules solaires à un seul gap ainsi qu'aux cellules multi-jonction.

Deux autres questions de recherche doivent être étudiées pour mettre en évidence ce concept autant du point de vue théorique qu'expérimental :

- 1- Est-ce que ces cellules dupliquées auront des performances supérieures aux cellules standards et qu'il y a moins de pertes résistives associées à ce concept à hautes concentrations ? Dans l'affirmative, peut-on en estimer le potentiel d'amélioration ?

2- Serait-il économiquement rentable d'utiliser ce type de cellules solaires en CPV ?

1.3 Objectifs du projet

Dans ces travaux de thèse, nous nous sommes intéressés à la question d'exploration de nouvelles architectures permettant de fonctionner efficacement à hautes concentrations (>1000 soleils). Nous avons, en effet, étudié la possibilité de réduire le coût de l'énergie par les cellules solaires dupliquées. Notre objectif principal était de concevoir les cellules dupliquées à base des matériaux III-V via une modélisation multi-physique et une simulation par une méthode basée sur les éléments finis. En particulier, nous avons étudié l'évolution de leurs facteurs de mérite (facteur de forme (FF), J , V_{OC} et efficacité) sur une large gamme de concentrations.

Les principaux objectifs de la présente thèse peuvent être subdivisés en plusieurs sous-objectifs :

- a- **Étude des caractéristiques des cellules dupliquées sous concentration** : un modèle semi-empirique basé sur la limite thermodynamique de Shockley-Queisser (SQ) [25] est développé pour étudier les cellules dupliquées en partant de deux types de cellules : la cellule simple-jonction GaAs et la triple-jonction $In_{0.51}Ga_{0.49}P/GaAs/Ge$. Contrairement au modèle standard de limite thermodynamique, les pertes résistives et de réflexion en face avant sont introduites pour étudier leurs impacts sur les facteurs de mérite des cellules dupliquées à hautes concentrations.
- b- **Étude du coût relatif** : après avoir identifié le design le plus efficace et qui exige des concentrations pratiquement atteignables, nous avons estimé son coût par rapport à une cellule classique. Pour cela, nous utilisons un modèle calibré sur un système commercial FLATCON CPV [13]. Durant cette étude, deux cas extrêmes sont pris en considération. Premièrement, l'augmentation de concentration n'ajoute pas des coûts supplémentaires liés aux autres composants du système CPV. Deuxièmement, nous prenons un cas réaliste où à chaque que le facteur de concentration se double alors le coût du système CPV augmente de 10%, 20% ou de 30%.
- c- **Validation expérimentale du concept** : dans cette étape, une structure à trois jonctions de GaAs (3xGaAs) est fabriquée et caractérisée en vue de valider le concept.
- d- **Simulation à l'aide de logiciel Silvaco Atlas** : c'est un moyen fiable pour la conception des cellules solaires à plusieurs jonctions qui permet d'optimiser différents

paramètres physiques de la couche : niveau de dopage, épaisseur, contacts métalliques, couches antireflets, etc. L'objectif ici est de trouver les combinaisons optimales entre ces différents paramètres pour identifier des structures efficaces qui peuvent être considérées comme une plateforme pour la croissance épitaxiale.

- e- **Optimisation des jonctions tunnel qui servent d'interconnexions électriques dans les cellules dupliquées** : l'objectif ici est de déterminer les plages d'opération optimales en fonction du dopage. En effet, plusieurs jonctions tunnel sont optimisées, par Silvaco Atlas, pour déterminer le compromis optimal entre une meilleure transparence optique et une faible résistance en série. Enfin, les facteurs de mérite des cellules dupliquées seront calculés en fonction des paramètres des jonctions tunnel.

1.4 Contributions originales

Ce projet aura permis d'enrichir les connaissances scientifiques à travers plusieurs contributions originales et significatives :

- La proposition et la validation d'une nouvelle architecture de cellules solaires ayant le potentiel de rendre le CPV une technologie compétitive dans le marché mondial de l'énergie solaire. Le concept a le potentiel de réduire les pertes résistives et opérer efficacement à des concentrations autrement considérées élevées ou extrêmes pour les cellules conventionnelles ;
- La mise en évidence de la pertinence de cette architecture de cellules solaires pour éviter les problématiques structurelles liées au désaccord de maille cristalline. En plus, cette stratégie est applicable pour les cellules à simple jonction aussi bien que pour des cellules MJ ;
- La détermination des paramètres requis pour la réalisation des jonctions tunnel performantes dans les cellules solaires dupliquées.

1.5 Organisation du document

Ce document est constitué de six chapitres. L'introduction s'attache à présenter le projet et définit les objectifs de recherche. Elle souligne également les contributions originales de cette thèse.

Une revue de la littérature présentée au chapitre 1 amorce d'abord cette thèse, permettant d'inscrire le projet dans son contexte général de l'évolution des systèmes photovoltaïques à concentrations

et dans son cadre spécifique de conception de nouvelles architectures permettant de minimiser les pertes résistives. Nous présentons également les différentes alternatives proposées dans la littérature pour réduire les pertes résistives. Enfin, une comparaison entre ces différentes stratégies est présentée pour mettre en valeur les avantages de notre approche.

L'essentiel des travaux réalisés et les résultats obtenus dans ce projet sont présentés dans les chapitres 3 et 4 sous forme de publications scientifiques. Le chapitre 3 présente les résultats de simulation des cellules dupliquées par le modèle multiphysique basée sur la limite SQ dont l'objectif est de montrer le potentiel d'augmenter le facteur de concentration et de diminuer les coûts. La description du modèle, sa calibration ainsi que les résultats obtenus sont présentés dans l'article. Le chapitre 4 présente la structure fabriquée 3xGaAs et leurs caractéristiques. Cette structure nous a permis de calibrer les modèles de simulation par Silvaco Atlas. Dans le chapitre 5, l'évolution de différents facteurs de mérite est présentée en se focalisant sur les cellules suivantes : 2xGaAs et 2xGaInP/2xGaAs. De plus, les résultats d'optimisation des jonctions tunnel sont aussi présentés dans ce même chapitre.

Finalement, le chapitre 6 résume les résultats principaux du projet et présente certaines pistes à explorer pour répondre à certains défis soulevés lors de ce projet.

Chapitre 2. ÉTAT DE L'ART

La réduction du coût de l'énergie solaire exige un fonctionnement efficace sous fortes concentrations. Pour cette raison, de nouveaux concepts sont nécessaires pour réduire les limitations liées aux pertes résistives sous concentration. Nous discutons dans ce chapitre du principe et de l'intérêt des cellules MJ. Nous présentons ensuite l'impact du CPV sur le rendement. Les limitations fondamentales et extrinsèques sous concentration solaire sont discutées en prenant l'exemple d'une cellule monolithique à trois jonctions, issue de la littérature. Les contributions des pertes résistives sous concentration dans les cellules seront alors dégagées.

Nous présentons aussi les différentes alternatives proposées dans la littérature pour minimiser les pertes résistives; le facteur le plus limitant sous concentration solaire. Ce chapitre se termine par une comparaison entre les différentes approches et notre concept des cellules dupliquées l'objet de cette thèse.

2.1 Cellules solaires multi-jonction

2.1.1 Introduction

Becquerel a découvert l'effet photoélectrique pour la première fois en 1839, en observant le passage du courant électrique entre deux électrodes quand on les expose au rayonnement lumineux [26]. La production du courant ne se produit qu'à partir d'un certain seuil de longueur d'onde indépendamment de l'intensité du faisceau. Il aura fallu attendre jusqu'à 1905 pour qu'Einstein et Planck inventent le principe du photon. L'effet photoélectrique est désormais la transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Les performances d'une cellule solaire à simple jonction p-n sont limitées par la gamme de longueurs d'onde de spectre solaire à absorber. Le photo-courant maximal délivré par une cellule est déterminé par la bande interdite du matériau, car seuls les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à l'énergie de cette bande interdite sont absorbés et convertis. En revanche, si l'énergie des photons absorbés est supérieure à cette dernière, l'excès d'énergie sera perdu par un processus appelé thermalisation en transférant la chaleur au réseau cristallin [27]. La **Figure 2-1 (a)** montre les pertes par transmission et thermalisation dans le cas d'une cellule de GaAs. Plus le gap du matériau utilisé augmente plus la tension photovoltaïque d'opération augmente et plus le photo-

courant délivré diminue. Le compromis entre une absorption élevée (ou photo-courant élevé) et une tension élevée conduit à une valeur du gap optimal égale à 1.4 eV (**Figure 2-1 (b)**). Le silicium a un gap de 1.1 eV, il est donc limité à une efficacité de conversion théorique maximale de 33% [28]. À ce jour, le rendement de conversion photovoltaïque le plus élevé atteint pour une cellule solaire de silicium cristallin en laboratoire est de 26,1% [29] (et 27.6% sous concentration solaire [30]). La bande interdite de GaAs (1.42 eV à 300 K) est plus proche de l'optimum pour les cellules à simple jonction avec un record d'efficacité de l'ordre de 27,8% (et 30,5% sous concentration) pour des cellules terrestres développées par Alta Devices [30].

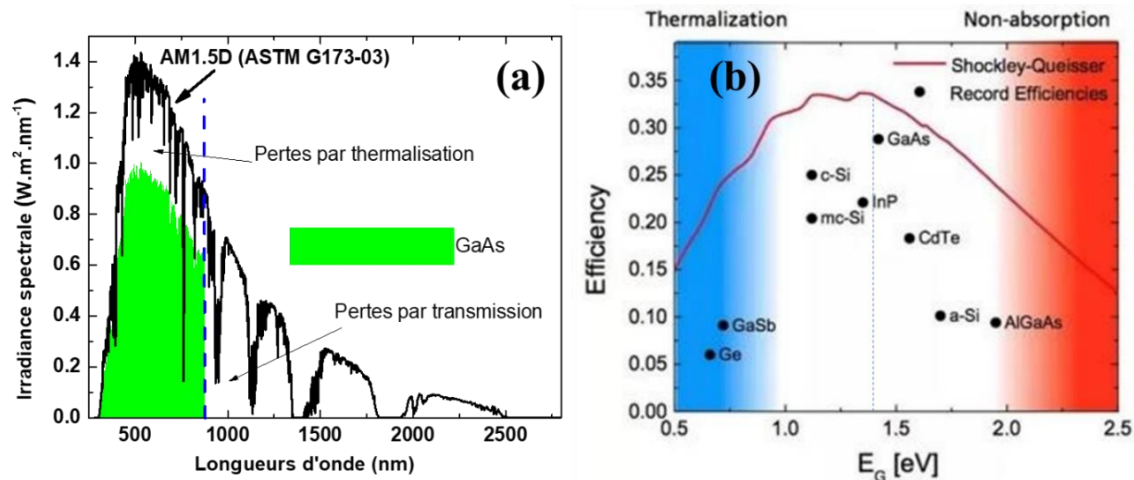


Figure 2-1 : (a) Évolution d'irradiance spectrale par une cellule à simple jonction; (b) l'évolution de l'efficacité en fonction de l'énergie de bande interdite.

2.1.2 Intérêt des cellules solaires multi-jonction

L'utilisation d'un système à plusieurs bandes interdites, ou cellules MJ, permet de surpasser les rendements solaires imposés par la limite thermodynamique sur les cellules de première génération (à simple jonction). En effet, chaque sous-cellule dans une MJ absorbe une gamme de longueurs d'onde menant ainsi à une exploitation maximale du spectre solaire. Les alliages des groupes III et V du tableau périodique sont de bons candidats pour la fabrication de telles cellules MJ grâce à : leurs bandes interdites qui couvrent une large gamme spectrale, et la plupart des bandes interdites sont directes, impliquant un coefficient d'absorption élevé [31]. La **Figure 2-2** montre le spectre solaire absorbé par une triple jonction monolithique InGaP/GaAs/Ge. La superposition d'une jonction de GaAs (**Figure 2-1 (a)**) avec une autre jonction de Ge de faible bande interdite (~0.67eV) permet de convertir les photons perdus par transmission. En revanche, l'ajout d'une

jonction d'InGaP de haute bande interdite ($\sim 1.89\text{eV}$) permet une conversion plus efficace des photons de grandes énergies. Dans cette configuration, la tension d'extraction de porteurs dans les sous-cellules InGaP et Ge est, respectivement, supérieure et inférieure par rapport à celle de la sous-cellule GaAs.

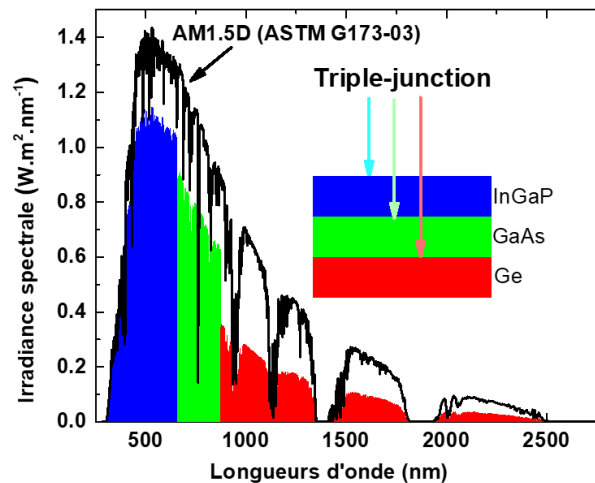


Figure 2-2 : Évolution d'irradiance spectrale par une cellule MJ InGaP/GaAs/Ge.

La **Figure 2-3** montre que l'efficacité théorique augmente quand le nombre de jonctions augmente. En effet, l'ajout d'autres jonctions supplémentaires réduit les pertes par transmission et thermalisation. Des efficacités théoriques de l'ordre de 51.8% et 59.2% sont obtenues pour des systèmes optimaux connectés en série de trois et cinq jonctions, respectivement. Pour une combinaison infinie de bandes interdites permettant d'absorber toute la gamme de longueurs d'onde entre l'ultra-violet et l'infrarouge (environ 4 eV), les pertes par thermalisation sont théoriquement nulles. Dans ce cas, la limite thermodynamique prévoit une efficacité maximale de 86.8% [32].

En pratique, les bandes interdites des matériaux constituant les cellules MJ représentés sur la **Figure 2-3** ne sont pas forcément en accord de maille, ce qui engendre des difficultés au niveau de croissance épitaxiale. En effet, la croissance des matériaux en désaccord de maille induit des dislocations de fortes densités, parois d'inversion ou des impuretés profondes; des facteurs qui dégradent les propriétés de transport de charges dans les hétérostructures [33]. Pour ces raisons, la plupart des recherches se focalisent sur la croissance des matériaux en accord de maille puisqu'ils sont faciles à croître, donc moins coûteux. Il est aussi possible de croître en série des matériaux en désaccord de maille par la croissance à collage moléculaire (*Wafer Bonding* en anglais) [34] ou en

utilisant des couches *buffers* à compositions graduelles [35]. Dans cette configuration, d'autres semi-conducteurs à trois, quatre ou cinq éléments peuvent être intégrés dans la même cellule augmentant ainsi l'absorption du spectre solaire. Parmi ces matériaux, nous pouvons citer : AlGaAs (1.6 eV), AlGaInP (2.2 eV), GaInP (1.7 eV), GaInAs (1.2 eV), GaInNAs (1.0-1.1 eV), etc. [36].

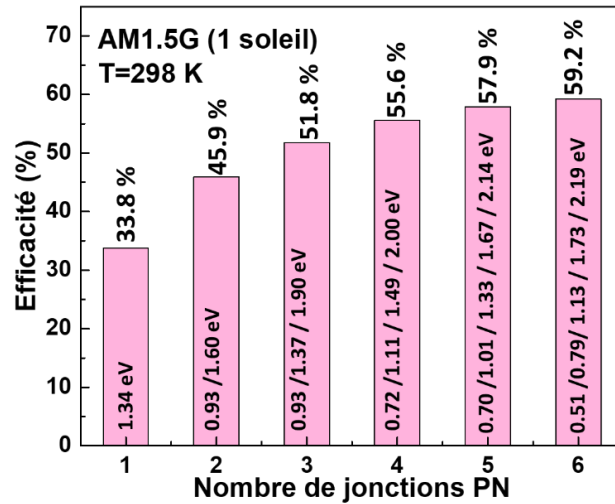


Figure 2-3 : Efficacité théorique maximale des cellules MJ à un soleil [36].

D'un point de vue électrique, dans une cellule MJ, toutes les sous-cellules sont connectées en série, donc la cellule qui génère le plus faible courant limite le courant de la cellule MJ alors que les tensions des sous-cellules s'ajoutent. Cela exige une meilleure optimisation de plusieurs paramètres (bande interdite, épaisseur, dopage, etc.) pour faire en sorte que les courants soient identiques le mieux possible.

Bien que le courant soit toujours limité dans une cellule MJ, le gain en tension permet l'obtention des rendements de conversion élevés par rapport à une cellule simple jonction. Nous démontrerons plus tard dans le document que ce type de cellules est particulièrement adapté pour l'utilisation sous lumière concentrée.

2.1.3 Industrie des cellules solaires multi-jonction

Le marché des cellules MJ III-V est dominé par les cellules triple-jonction avec un coût de fabrication de l'ordre de 20 000 USD/m², soit environ 50 USD/Watt pour une efficacité de l'ordre de 40% sous concentration [37]. Ce coût élevé provient de plusieurs facteurs, dont le coût élevé et la rareté de la matière première en matériaux III-V. Le coût du substrat (Ge ou GaAs dans ce cas)

représente une fraction importante (>50%) du coût d'une cellule solaire [38]. Autres facteurs contribuent, tels que les métallisations en or ou argent qui coûtent relativement cher, ainsi que les limitations imposées par la vitesse de croissance par épitaxie. Pour cela, nous pouvons agir sur deux leviers en particulier pour baisser le coût des cellules MJ; d'une part l'optimisation de la quantité de matière à utiliser et d'autre part l'amélioration des procédés de croissance.

En principe, la réutilisation de substrat est ainsi une approche prometteuse et consiste à réaliser la croissance d'une cellule sur un substrat III-V puis la détacher du substrat pour les apporter sur un autre substrat à bas coût comme le silicium. Ainsi, le substrat III-V peut être réutilisé pour réaliser d'autres croissances. Horowitz et al. [37] montrent qu'avec cinq réutilisations du substrat, le prix des MJ pourrait être divisé par quatre dans une approche moyen terme. L'empilement mécanique des cellules MJ sur un substrat de silicium apparaît comme une autre approche fiable dont l'objectif est de produire des cellules MJ III-V sur des substrats adaptés, mais moins coûteux [39]. À long terme, les cellules MJ ont donc le potentiel de voir leur coût réduit possiblement d'une dizaine de fois. Malgré cela, leur coût par Watt ne leur permettrait pas d'être compétitives par rapport aux cellules standards à base de silicium. La concentration solaire, permettant de réduire la taille de la cellule, doit donc être utilisée. Cette dernière a le potentiel de rendre les cellules MJ III, de très hauts rendements, très compétitives dans le marché énergétique.

2.2 Cellules MJ sous concentration solaire

Dans cette partie, le principe de fonctionnement d'une cellule MJ est abordé en partant d'une sous-cellule simple. Nous analysons ensuite l'utilité de différentes couches incluses dans la sous-cellule afin de comprendre les facteurs limitants sous concentration solaire. Nous généralisons l'étude sur une cellule triple-jonction issue de la littérature.

2.2.1 Structure d'une sous-cellule et facteurs de mérite

Une sous-cellule est formée par la juxtaposition de deux régions semi-conductrices N et P comme présenté sur la **Figure 2-4 (a)**. Cette structure contient plusieurs composantes fondamentales :

- Une couche fenêtre et le BSF (pour *Back Surface Field* en anglais) qui passivent les faces avant et arrière respectivement. La couche fenêtre se constitue d'un matériau fortement dopé N^+ et de large bande interdite pour empêcher les recombinaisons de surface. Comme

démonstré à la **Figure 2-4 (b)**, cette couche doit avoir un offset de bande de valence élevé par rapport à l'émetteur afin de créer une barrière de potentiel pour les trous minoritaires. La couche BSF a pour rôle la création d'un champ électrique en face arrière permettant d'abaisser la valeur effective de la vitesse de recombinaison des porteurs. Elle se comporte comme une barrière de potentiel pour les électrons minoritaires (voir **Figure 2-4 (b)**);

- L'émetteur et la base forment la jonction PN;
- Les contacts N et P sont pour collecter les porteurs photo-générés et on met une couche d'antireflet pour minimiser les pertes par la réflexion des photons incidents en face avant.

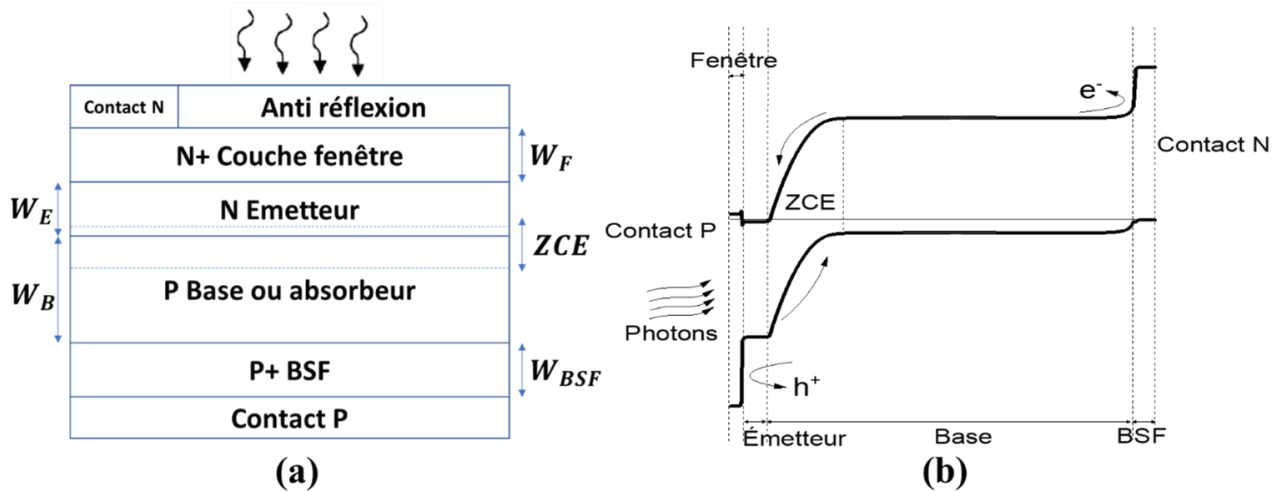


Figure 2-4 : (a) Structure typique d'une sous-cellule de la cellule MJ; (b) Diagramme de bandes en équilibre thermodynamique d'une sous-cellule correspondant à la structure présentée.

Le principe de base d'une cellule solaire repose sur la réduction des processus de recombinaisons en forçant les électrons et les trous à se diriger dans deux sens opposés. En effet, le mécanisme de diffusion de porteurs majoritaires sous la poussée de l'agitation thermique permettra de former une zone dépourvue de porteurs libres appelée zone de charge d'espace (ZCE) où il apparaît alors une différence de potentiel dans la zone courbée de diagramme de bande comme montré **Figure 2-4 (b)**. La cellule solaire fonctionne sous polarisation directe ($V > 0$), donc, la barrière de potentiel deviendra de plus en plus faible avec la polarisation et la concentration de porteurs majoritaire augmente. Les points clés à optimiser dans une cellule solaire sont les suivants :

- La bande de valence pour l'émetteur et la bande de conduction pour la base doivent avoir une discontinuité agissant comme une barrière de potentiel pour les porteurs minoritaires. Dans ce cas, ces porteurs évitent les surfaces où ils se recombinent. Cependant, les bandes

de porteurs majoritaires ne doivent pas avoir des discontinuités afin de pouvoir être acheminés aux électrodes.

- Les deux couches *fenêtre* et BSF doivent être en accord de maille avec la jonction PN et avoir une faible densité de défauts pour limiter la vitesse de recombinaison. Dans ce cas de figure, la couche fenêtre et le BSF passivent la face avant et l'interface avec la couche tampon respectivement. Contrairement aux cellules de Si où les surfaces sont passivées par des diélectriques comme SiO₂, TiO₂, a-Si :H, des cellules III-V se passivent par des matériaux ayant une grande énergie de bande interdite et en accord de maille.

La densité du courant total J délivré par la cellule est donnée de manière générale par l'expression suivante [40]:

$$J(V) = I_{ph} - J_0 \left(\exp \left(\frac{q(V + R_S J)}{n k_B T} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_S J}{R_{SH}}, \quad (2.1)$$

où n est le coefficient d'idéalité qui quantifie les recombinaisons à l'intérieur de la ZCE, k_B est la constante de Boltzmann, T est la température de fonctionnement de la cellule et q est la charge électronique élémentaire. J_{ph} et J_0 sont respectivement le photo-courant et le courant de saturation. R_S est la résistance série qui doit être minimale pour limiter la dégradation du courant électrique (plus de détails sont présentés dans la suite du chapitre). R_{SH} est la résistance parallèle de shunt qui doit être extrêmement élevée pour minimiser ces courants et assurer une extraction efficace de porteurs de charge au niveau des contacts.

Les facteurs de mérite principaux d'une cellule solaire sont extraits de la caractéristique $J(V)$, représentée sur la **Figure 2-5**.

- La tension à circuit-ouvert V_{OC} est la tension maximale aux bornes de la cellule à courant nul ($V_{OC}=V(J=0)$). Elle dépend de la température de fonctionnement, de la bande interdite du matériau et de la nature du spectre solaire utilisé;
- Le courant à court-circuit J_{SC} est le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même. Il dépend généralement de dimensions de la cellule et l'intensité de l'illumination reçue. Il tend vers le photo-courant J_{ph} quand la résistance série devient négligeable ou/et la résistance de shunt R_{SH} devient extrêmement élevé;
- Le point de puissance maximale P_M correspond au maximum du produit $J.V$;

- Le facteur de forme FF est égal au rapport entre la puissance maximale P_M et le produit $J_{sc} \cdot V_{oc}$;
- L'efficacité de conversion η est désormais calculée par le rapport :

$$\eta = \frac{P_M}{P_{IN}} = \frac{V_{oc} J_{sc} FF}{P_{IN}}, \quad (2.2)$$

où P_{IN} est la puissance solaire incidente sur la cellule par unité de surface.

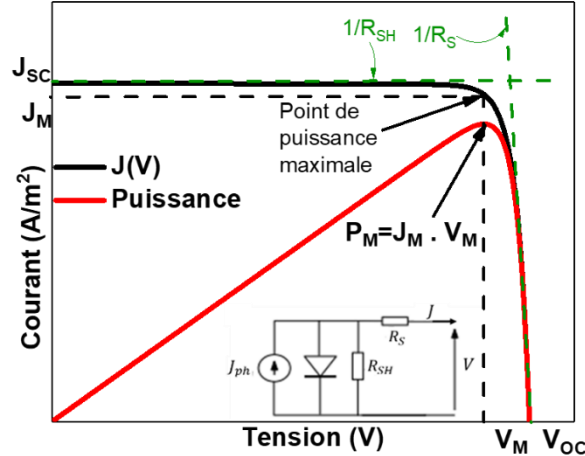


Figure 2-5 : Caractéristique $I(V)$ typique d'une sous-cellule solaire typique. Inset : modèle électrique simple pour une cellule solaire réelle.

2.2.2 Mécanismes de pertes dans une cellule solaire

2.2.2.1 Pertes fondamentales

Ces pertes sont inévitables et présentes dans toutes les cellules solaires [41]. La bande interdite du matériau semi-conducteur est considérée comme le principal facteur limitant. Seulement les photons ayant une énergie supérieure ou égale au gap vont être absorbés en créant des porteurs photoexcités. Les photons d'énergie supérieure au gap provoquent un échauffement du matériau par le mécanisme de thermalisation dans un temps de quelques picosecondes (mécanisme (1) sur la **Figure 2-6**). En plus, le mouvement de porteurs de charges génère un courant électrique ainsi que la chaleur *Joule* due à l'accélération de porteurs par le champ électrique élevé dans la ZCE (mécanisme (2)) [42].

Selon la loi de Kirchhoff, les absorbeurs sont aussi des émetteurs naturellement. La réémission de photons consécutive à la recombinaison des porteurs photo-générés est aussi un facteur limitant (mécanisme (3)). La recombinaison volumique dans la cellule solaire est gouvernée par trois

différents mécanismes : radiative, Shockley–Read–Hall et Auger. La recombinaison radiative est causée par l'échange d'énergie entre un porteur de charge et un photon. Elle est plus prédominante dans les semi-conducteurs à bande interdite directe qu'indirecte. Les deux derniers mécanismes sont non radiatifs et sont définis comme l'échange d'énergie entre les porteurs et le réseau cristallin à travers des pièges dans la bande interdite (cas de SRH) ou seulement entre les porteurs (cas de Auger) [43]. Les recombinaisons de surface de porteurs minoritaires sont causées par les liaisons pendantes aux interfaces entre deux matériaux différents qui sont considérées comme un continuum de pièges ou états de surface (mécanisme (4)). Le mécanisme (5) représente la perte sous forme de chaleur de *Peltier* causée par la libération d'énergie lors du saut des électrons (trous) de la bande de conduction (valence) vers le niveau de Fermi pour être collectés par le circuit externe [42].

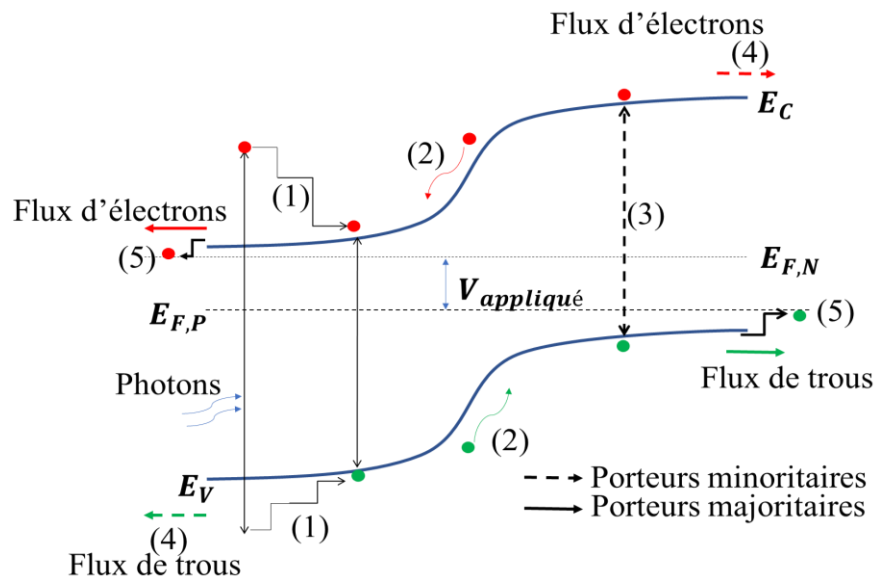


Figure 2-6 : Mécanisme de génération et de pertes par : (1) perte par thermalisation (2), perte dans la jonction par effet Joule (3), perte par recombinaisons volumiques (4), perte par recombinaisons surfaciques et (5) perte dans les contacts (chaleur de Peltier).

Deux autres mécanismes de pertes à mentionner ; le mécanisme de Carnot qui provient de conversion de l'énergie thermique en travail d'entropie libre, et le mécanisme de Boltzmann due à l'inégalité entre l'angle d'absorption (Ω_{abs}) et celle de l'émission (Ω_{emit}) qui entraîne la génération d'entropie par l'expansion des modes photoniques. Ces deux mécanismes entraînent une dégradation de V_{OC} décrite par le formalisme proposé par *Shockley et Queisser* [25] et affiné par la suite par *C. Hirst et al.* [41] :

$$eV_{OC} = E_g \left(1 - \frac{T_C}{T_S}\right) - k_B T_C \ln \left(\frac{\Omega_{emit}}{\Omega_{abs}}\right) + k_B T_C \ln \left(\frac{\gamma(E_g, T_S)}{\gamma(E_g, T_C)}\right) \quad (2.3)$$

$$\gamma(E, T) = \frac{2k_B T}{h^3 c^2} (E^2 + 2k_B T E + 2k_B^2 T^2) \quad (2.4)$$

Avec e est la charge élémentaire ; T_S et T_C sont les températures du soleil et de la cellule, respectivement ; h est la constante de Planck et c représente la vitesse de la lumière. Le premier et le deuxième terme dans l'équation (2.3) représentent le facteur de Carnot et Boltzmann, respectivement. Le troisième terme décrit l'augmentation de l'énergie libre par porteur produite par l'inégalité entre la température de photons émis et absorbés.

Cependant, il est possible de réduire l'impact de ces pertes en améliorant la qualité des matériaux utilisés ou en modifiant l'architecture du système photovoltaïque. Deux alternatives de conception sont possibles :

- Plus la concentration de lumière augmente plus l'angle d'émission tend vers l'angle d'absorption et le facteur de Boltzmann tend vers zéro ;
- L'utilisation des cellules solaires à plusieurs bandes interdites empilées verticalement (ou MJ) permet de fractionner le spectre solaire et donc de réduire les pertes par thermalisation.

2.2.2.2 Pertes extrinsèques

En plus de pertes fondamentales, l'efficacité de conversion peut être limitée par d'autres types de pertes extrinsèques qui sont théoriquement évitables, mais nécessitent une meilleure optimisation par le fabricant :

- Recombinaisons parasites ou recombinaisons non radiatives causées principalement pas les défauts dans les semi-conducteurs.
- Ombrage sur la cellule solaire due aux contacts métalliques en face avant. Cette limitation nécessite une optimisation de la grille pour minimiser la surface occupée par les contacts.
- Pertes par réflexion de la lumière intervenant à chaque surface marquant un saut d'indice de réfraction. En cas de face avant de la cellule, elles peuvent être réduites par le dépôt des couches d'antireflet (*ARC* pour *Anti-Reflective Coating*) et/ou par la texturation de surface de la cellule.

- Pertes résistives, générée par les courant circulant dans les différentes régions de la cellule, qui font l'objet de la section suivante.

2.2.3 Pertes résistives dans une cellule MJ

Le passage du courant dans la cellule solaire est affecté par la présence de résistance série. La résistance électrique totale dans une cellule MJ est la somme des résistances de toutes les composantes présentes dans la structure. La **Figure 2-7** illustre les différentes contributions latérales (grilles de contact ou électrodes R_E , surface latérale R_{SL} , fenêtre, base, émetteur et jonctions tunnels R_{JT1} , R_{JT2}) et verticales (contacts R_C , interface BSF/substrat et jonctions tunnels) de la résistance série d'une triple-jonction GaInP/GaAs/Ge. Ces composantes sont propres aux matériaux épitaxiés ou liées à la technologie de croissance de matériaux et la fabrication des cellules MJ. Pour réduire leurs effets, une étude plus approfondie doit être effectuée sur la pureté des matériaux semi-conducteurs à utiliser, notamment vis-à-vis la mobilité des porteurs. En plus, il faut trouver la combinaison optimale des paramètres comme le dopage et épaisseur afin de réduire les résistances latérales. Une autre composante à ne pas négliger est celle de barrières de potentiel aux hétérojonctions surtout au niveau de la jonction tunnel [17]. L'effet d'hétérojonctions peut être minimisé par une optimisation des offsets de bandes et de dopage des matériaux pour favoriser un transport par effet tunnel ou par émission thermoïonique [17].

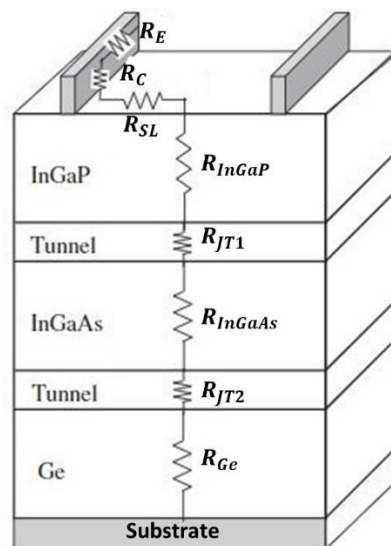


Figure 2-7 : Les différentes contributions de la résistance série dans une sous-cellule solaire [44].

Les principales contributions de la résistance série ayant un impact sur les performances des cellules MJ sous concentration sont :

- La contribution des contacts en face avant. En effet, plus la concentration augmente plus la densité de doigts de grilles métalliques (*grid fingers* en anglais) doit être élevée pour extraire la densité de porteurs extrêmement élevée [45]. En revanche, ceci augmentera l'ombrage sur la cellule MJ, donc, un compromis entre ces deux paramètres est nécessaire.
- La contribution latérale de l'émetteur. Ochoa et al. [17] ont montré que l'épaisseur et le dopage d'émetteur ont une grande influence sur la conductivité latérale.
- La contribution des jonctions tunnel. *Walker et al.* [46] ont montré que le dopage et le gap des jonctions tunnel affectent l'efficacité des cellules MJ sous concentration quand le courant généré devient très élevé.

Le **Tableau 2-1** montre des valeurs typiques des principales contributions de résistances séries pour une cellule simple-jonction de GaAs et pour la triple-jonction de la **Figure 2-7**.

Tableau 2-1 : Valeurs mesurées des résistances séries de la simple jonction GaAs et la triple-jonction GaInP/GaAs/Ge.

Résistance	Simple jonction GaAs [47] ($\text{m}\Omega.\text{cm}^2$)	Résistance	Triple jonction GaInP/GaAs/Ge [44] ($\text{m}\Omega.\text{cm}^2$)
Grilles (métal)	0.23	R_E	0.66
Contact face avant et arrière	1.98	R_{SL}	0.50
Émetteur	0.76	R_{JT1}	0.05
Base	0.07	R_{JT2}	0.04

Les pertes résistives ont une influence majeure sur les performances des cellules MJ sous concentration solaire. La puissance perdue par effet Joule dépend linéairement de R_S et quadratiquement du courant généré par la cellule J (c.-à-d. $P_{\text{Joule}} = R_S J^2$). En utilisant un modèle à une seule diode, la concentration correspond au maximum d'efficacité s'écrit :

$$X_M = \frac{nk_B T/q}{R_S J(1)} \quad (2.5)$$

Cette équation démontre que, à une température constante, la résistance série et le courant sont les facteurs pratiques qui peuvent limiter le facteur de concentration d'une cellule solaire. Sachant que les cellules MJ génèrent moins de courant, offrant l'accès à des rendements élevés à fortes concentrations solaires, leur conception exige donc une réduction de la résistance série.

2.2.4 Impact de la concentration solaire

2.2.4.1 Effets optiques et électriques

En plus de sa capacité de réduire le coût des cellules solaires MJ, le CPV doit augmenter l'efficacité pour permettre l'utilisation des cellules solaires III-V dont la matière première est relativement chère. En effet, la concentration augmente la concentration de photons et donc augmente la densité de porteurs photo-générés. Dans ce cas, le courant d'une cellule MJ est directement proportionnel au facteur de concentration X :

$$J(X) = X \cdot J(1) \quad (2.6)$$

Ce résultat est basé sur les hypothèses que les paramètres des semi-conducteurs et la température d'opération ne sont pas affectés par la concentration solaire. En négligeant le courant de saturation de la diode par rapport au courant photo-généré [13], le V_{OC} augmente aussi de manière logarithmique en fonction de X selon:

$$V_{OC}(X) \approx V_{OC}(1) + n \frac{k_B T}{q} \ln(X) \quad (2.7)$$

Où n est le facteur d'idéalité de la cellule.

Dans ce cas de figure, selon l'équation (2.2), trois termes positifs se multiplient dans l'expression de l'efficacité $\eta(X)$: l'efficacité sans concentration, le rapport des facteurs de forme ainsi qu'un troisième terme (>1) qui dépend de la concentration et de V_{OC} à un soleil.

$$\eta(X) = \eta(1) \left(\frac{FF(X)}{FF(1)} \right) \left(1 + \frac{\frac{k_B T}{q} \ln(X)}{V_{oc}(1)} \right) \quad (2.8)$$

Bien évidemment les cellules solaires doivent être refroidies, car l'augmentation de la température de la cellule réduit le V_{oc} . Dans une cellule réelle, le FF est fortement affecté par les résistances séries quand la concentration augmente donc le rapport $\frac{FF(X)}{FF(1)}$ n'est pas toujours supérieur à 1. Par conséquent, l'efficacité en fonction de concentration possède un maximum.

Afin de mieux comprendre l'impact de concentration solaire sur les facteurs de mérite, nous prenons le cas d'une triple-jonction InGaP/GaAs/Ge issue de la littérature [17], où les trois jonctions sont crues de manière monolithique avec des jonctions tunnel faisant la connexion entre chaque jonction. La **Figure 2-8** représente l'évolution de V_{oc} , J_{sc} , FF et l'efficacité sous concentration.

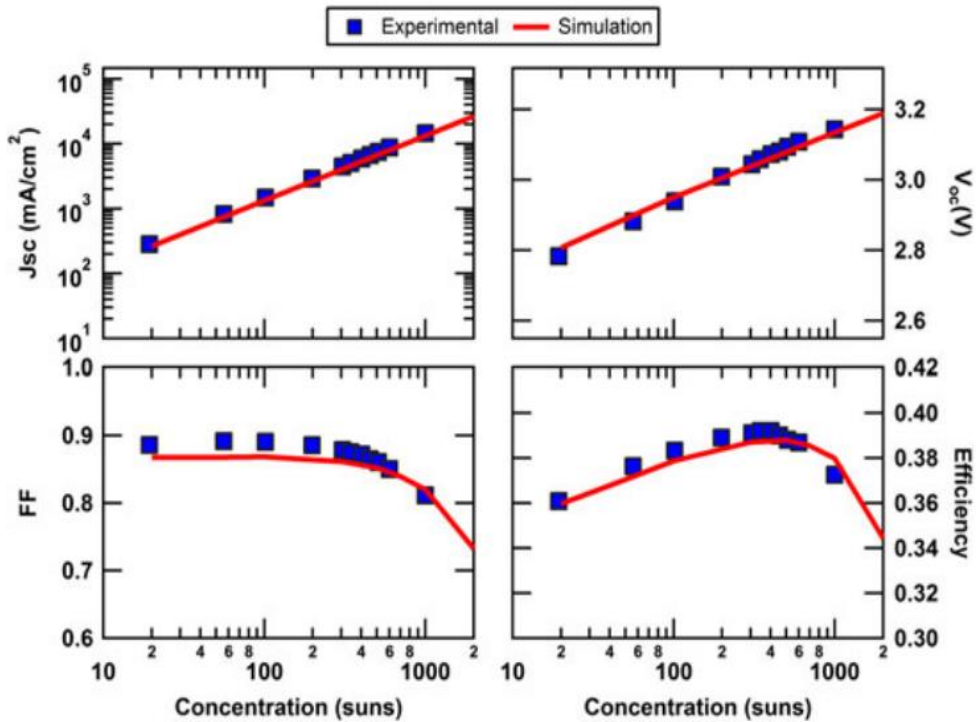


Figure 2-8 : Les paramètres d'une cellule triple-jonction GaInP/GaAs/Ge calibrée [17].

Comme prévu, nous observons une évolution linéaire de J_{sc} et une évolution logarithmique de V_{oc} . L'efficacité varie de manière similaire pour de faibles concentrations et atteint une valeur maximale à ~400 soleils, la concentration à partir de laquelle l'efficacité de la cellule se dégrade.

Cette chute est reliée à la dégradation du FF à partir de 30 soleils. En d'autres mots, le rapport $\frac{FF(X)}{FF(1)}$ devient de plus faible pour des concentrations supérieures à 30 soleils à cause d'une résistance série non négligeable.

Les auteurs ont étudié plusieurs voies d'amélioration de performance à hautes concentrations, entre autres, le dopage de l'émetteur de la sous-cellule de GaInP. Un fort dopage ($>10^{19} \text{ cm}^{-3}$) réduit le courant J_{SC} due à la réduction des longueurs de diffusion des porteurs minoritaires. En revanche, ils ont montré que l'augmentation de dopage améliore le FF dû à une réduction de la résistance latérale de l'émetteur. Ceci pourrait améliorer légèrement l'efficacité malgré la dégradation du J_{SC} .

Ils ont démontré aussi que l'augmentation du dopage de la couche fenêtre (AlInP) permet de réduire la densité de courant dans l'émetteur de GaInP afin d'améliorer sa conductivité latérale.

La **Figure 2-9** montre que le maximum d'efficacité varie d'une manière significative en fonction de résistance de grille métallique surtout à fortes concentrations.

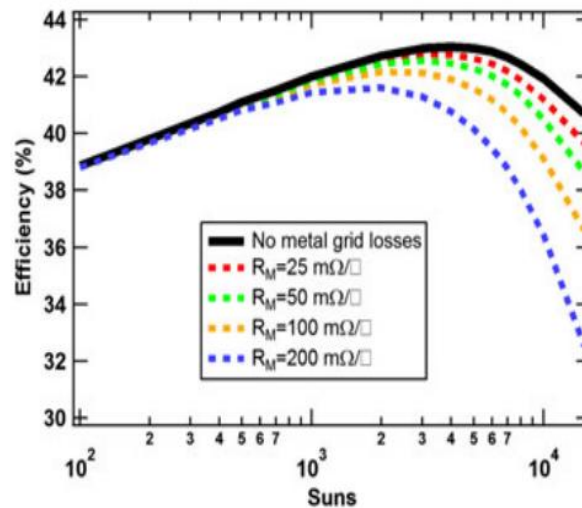


Figure 2-9 : Efficacité de la cellule GaInP/GaAs/Ge en fonction de la résistance de grille métallique. Un facteur d'ombrage de 3% est considéré [17].

2.2.4.2 Effets thermiques

D'un point de vue thermique, la cellule solaire GaInP/GaAs/Ge fait 1 mm^2 de surface, permettant non seulement une réduction de résistance de la grille, mais aussi une meilleure extraction de chaleur à hautes concentrations. Généralement, la température d'opération d'une cellule solaire

devient un paramètre crucial à fortes concentrations à cause de la grande quantité de photons reçus [36]. Cette température dépend de plusieurs paramètres tels que le lieu d'opération, packaging, architecture de la cellule et des phénomènes fondamentaux (tels que la thermalisation, dissipation par effet Joule, recombinaison non radiative, etc.). L'augmentation de la température réduit les bandes interdites des matériaux utilisés en augmentant le courant de saturation de la cellule, ce qui entraîne une dégradation du V_{oc} [48]. Cette problématique affecte aussi l'équilibre du courant dans les cellules MJ et réduit ainsi les performances des cellules sous concentration solaire. En plus, la surchauffe de la cellule réduit la conductivité des matériaux, amplifiant ainsi les effets résistifs [49]. Il provoque aussi une dilatation thermique et une accélération des processus de diffusion dans les métaux, des phénomènes qui mènent à une rupture d'opération ou d'altérer de façon permanente la productivité des cellules solaires [50].

Deux alternatives sont proposées dans la littérature pour maintenir la température de fonctionnement des modules CPV suffisamment basse [51]. Un système passif qui ne repose que sur le milieu ambiant pour extraire la chaleur. Cette méthode est souvent utilisée pour des modules non concentrés ou à faible concentration. Dans le cas d'un système à très forte concentration, il pourrait être intéressant d'employer un système actif pour lequel un liquide caloporteur est mis en circulation pour collecter la chaleur des cellules.

2.3 Approches alternatives pour la minimisation des pertes résistives dans les cellules MJ

Le niveau de concentration dans la plupart des cellules MJ reste toujours inférieur à 1000 soleils [29], [52]. Parmi les raisons qui expliquent cette limite atteinte, nous pouvons mettre l'accent sur les méthodes de croissance utilisées qui introduisent des défauts cristallins dans la structure [2], [53]–[55]. En plus, parfois les valeurs de R_s élevées [13], [47] et des tailles de cellules trop grandes ne sont pas adaptées à la forte concentration [65]. Finalement, le niveau de concentration peut être limité par les contraintes sur l'angle d'acceptance et la tolérance d'alignement des systèmes de concentration [56].

Plusieurs alternatives ont été proposées dans la littérature pour minimiser les pertes résistives dans les cellules solaires sous concentrations. Elles consistent en l'optimisation de la structure ou l'amélioration de la qualité des matériaux utilisés (semi-conducteurs, oxydes et métaux).

2.3.1 Optimisation de la grille métallique

Dans certains cas, la composante la plus critique de la résistance série est celle provenant du contact avant. Pour des cas non optimisés, elle peut représenter jusqu'à 50% de résistance d'une cellule solaire [18]. Il est important de noter que pour les cellules solaires délivrant des courants très élevés sous concentrations, des contacts quasi ohmiques sont impératifs pour augmenter l'efficacité d'extraction des porteurs de charge au niveau des contacts. Dans cette perspective, plusieurs méthodes sont présentées dans la littérature permettant de minimiser la résistance spécifique de contact métal/semi-conducteur [57]–[60]. La première et la plus évidente est la réduction de la résistance de contact. *P.Huo et al* ont proposé un empilement métallique de Pd/Ge/Ti/Pd/Al ayant une faible résistance ($\sim 3.4 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$) grâce à la présence de Ti/Pd qui se comporte comme une barrière pour empêcher les diffusions entre la couche de contact GaAs et la couche métallique l'aluminium [18]. La **Figure 2-10** montre l'évolution d'efficacité, FF et V_{OC} d'une cellule triple-jonction pour trois cas; Pd/Ge/Ti/Pd/Al (16 doigts métalliques); Pd/Ge/Ti/Pd/Al (8 doigts métalliques) et Au/Ge/Ni/Au (8 doigts métalliques). Le choix des métaux de contact s'effectue selon son travail de sortie [61]. Idéalement, un métal ayant un travail de sortie inférieur à celui de semi-conducteur de type n est souhaité pour obtenir des contacts ohmiques à faible résistance. Dans le cas d'un semi-conducteur de type p, le travail de sortie du métal doit être supérieur à celui du semi-conducteur, ce qui pose une problématique, car il n'y a pas suffisamment de métaux avec cette condition pour établir de bons contacts avec un semi-conducteur de type p [50]. La **Figure 2-10** souligne également un point important que l'augmentation du nombre de doigts métalliques augmente les performances sous concentrations.

La géométrie des contacts frontaux a aussi un impact sur la résistance série [62]. *Bissels et al* ont montré que l'utilisation des motifs circulaires et carrés inversés réduit la résistance série grâce à l'implémentation de *barres bus* tout autour de la cellule au lieu de deux cotés seulement comme dans les géométries conventionnelles [63].

Bien que cette technologie soit bien connue et testée [64], elle présente quelques limitations. Il est difficile d'optimiser simultanément tous les paramètres indépendants. En particulier, la minimisation de ces résistances reste ultimement limitée par le compromis qui doit être fait avec les pertes par ombrage. En plus, puisque le fonctionnement sous concentration provoque des

inhomogénéités de distribution de l'irradiance, la grille métallique devra être optimisée afin de minimiser l'effet de cette inhomogénéité sur le courant électrique [13].

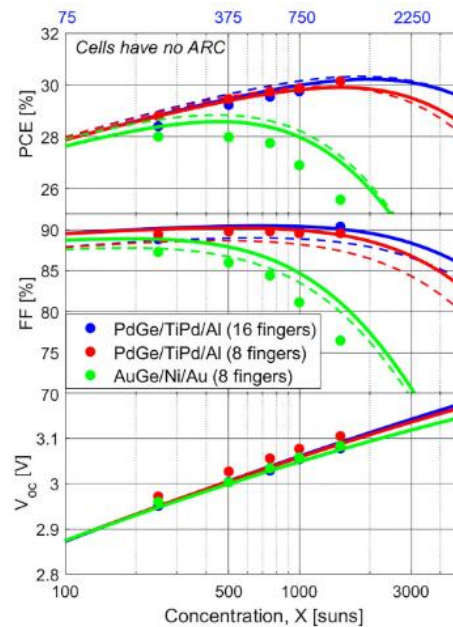


Figure 2-10 : Figures de mérite d'une cellule triple jonction GaInP/GaAs/Ge en fonction de concentration pour différents empilements métalliques [18].

2.3.2 Jonctions tunnel à faible résistance

La connexion entre deux sous-cellules dans une cellule MJ forme une jonction p-n inversée et extrêmement résistive engendrant ainsi une chute de tension significative dans la cellule solaire. Par conséquent, une jonction p-n appelée jonction tunnel où chaque côté est fortement dopé, pour être dégénéré, est rajoutée pour faciliter le transport de charges entre les différentes sous-cellules. Le diagramme de bande d'une jonction tunnel et les niveaux de Fermi sont représentés dans la **Figure 2-11 (a)**. Comme démontré dans la **Figure 2-11 (b)**, une jonction tunnel est caractérisée par un courant pic (J_P) qui doit être très supérieur au courant généré par la cellule afin de minimiser la résistance série R_{TJ} de la jonction. Cette exigence devient critique à hautes concentrations quand le courant devient élevé, ce qui nécessite des jonctions tunnel ayant J_P très élevé. Dans la littérature, on retrouve des jonctions tunnel avec du GaAs présentant des valeurs du J_P record, telles que GaAs/GaAs (8630 A/cm² [65]) et AlGaAs/GaAs (10100 A/cm² [65]), ou d'autres combinaisons de matériaux plus transparents que le GaAs, telles que GaInP/AlGaAs, AlGaAs/AlGaAs ayant des J_P moins élevés de l'ordre de 937 A/cm² et 900 A/cm², respectivement [61].

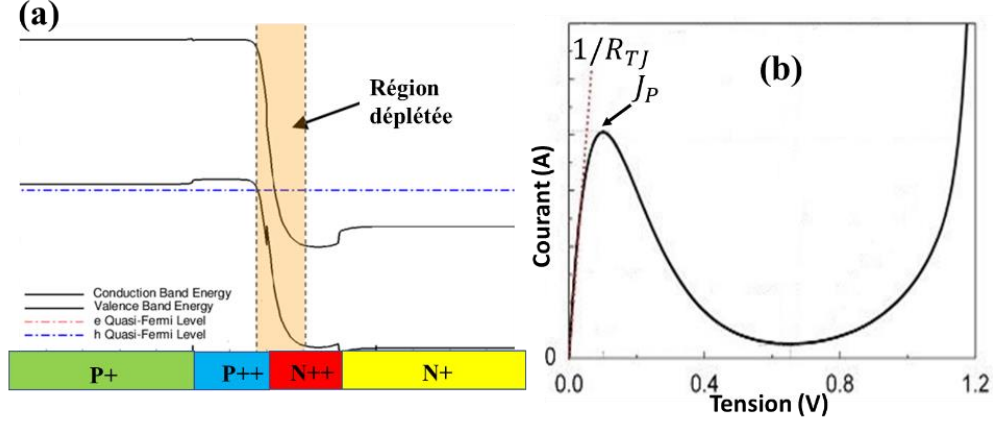


Figure 2-11 : (a) Diagramme de bande en équilibre thermodynamique d'une jonction tunnel p+/p++/n++/p+ et les niveaux de Fermi; (b) la courbe J-V typique d'une jonction tunnel [66].

Une manière pratique d'augmenter le J_p (c.-à-d. réduire la R_{TJ}) consiste à augmenter le dopage de la jonction p++/n++. *Wheelodon et al* ont simulé le J_p et la R_{TJ} de quatre différentes jonctions en fonction du dopage effectif [61] (voir la **Figure 2-12**). Cette étude montre que, à un niveau de dopage effectif donné, la résistance série diffère d'une jonction tunnel à l'autre. Les jonctions à base de GaAs exigent un dopage effectif relativement faible ($\leq 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) pour obtenir un J_p acceptable pour le fonctionnement à 2000 soleils. Dans ce cas de figure, de faibles résistances séries ($\leq 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$) sont atteintes.

Théoriquement, le pic du courant varie en fonction de dopage effectif N_{eff} et le gap du matériau selon cette formule [61]:

$$J_p \propto \exp - \frac{E_g^{3/2}}{\sqrt{N_{eff}}} \quad (2.9)$$

Avec $N_{eff} = \frac{N_{P++} \cdot N_{N++}}{N_{P++} + N_{N++}}$. Par conséquent, des jonctions tunnels à faible gap et/ou à fort dopage sont nécessaires pour minimiser la résistance série. En plus, certains chercheurs ont utilisé des puits quantiques dans les jonctions tunnel pour améliorer le J_p [67], [68].

Toutefois le développement des jonctions tunnel est limité par quelques désavantages. D'une part, selon l'équation (2.9), l'obtention d'un J_p élevé exige l'emploi des matériaux de faibles gaps, ce qui augmente le risque d'une absorption de la jonction tunnel. Donc un compromis entre une faible absorption et un dopage élevé est nécessaire pour minimiser la résistance série. D'autre part, il n'est pas toujours facile d'obtenir des niveaux de dopage élevés et précis pour des couches

ultraminces (~ 40 nm). Finalement, l'obtention des niveaux de dopage élevés dans des matériaux à larges bandes interdites, pour lesquelles l'énergie d'activation est très importante [69], reste typiquement d'autant plus problématique en pratique.

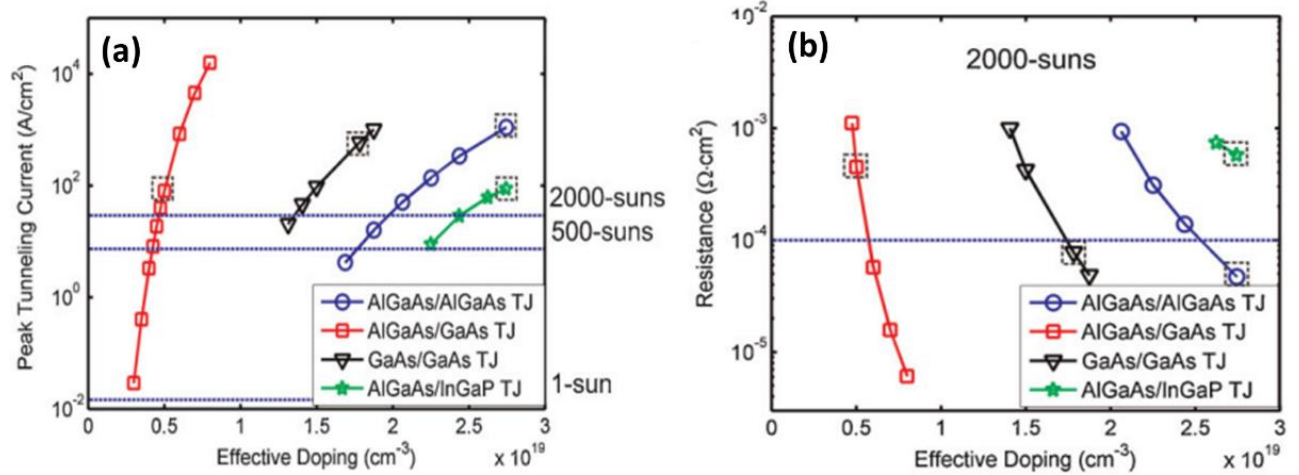


Figure 2-12 : (a) Pic du courant et (b) résistance série à 2000 soleils en fonction du dopage effectif. Le courant minimal requis à 2000 soleils pour une cellule triple-jonction est de l'ordre de $28 A/cm^2$.

2.3.3 Dimensions des cellules solaires

La diminution des dimensions des cellules peut également entraîner une diminution des pertes de résistance série, grâce à une réduction de l'aire de la surface active ($\leq 1 mm^2$) [70], [71]. La **Figure 2-13 (a)** représente l'évolution d'efficacité théorique pour une cellule triple-jonction InGaP/(In)GaAs/Ge en fonction de concentration pour plusieurs dimensions nominales (de 0.1 mm jusqu'à 10 mm). Selon les auteurs, l'amélioration d'efficacité en fonction de concentration résulte principalement de la minimisation de résistance série, ce qui est soutenue par l'augmentation du FF au-dessus de 100 soleils, comme montré à la **Figure 2-13 (b)**. L'ultra-miniaturisation permet aussi de faciliter le refroidissement passif pour des systèmes à très fortes concentrations [72]. Cependant, certains défis de fabrication liés à la petite taille des cellules et au nombre accru d'unités à manipuler sont attendus [71].

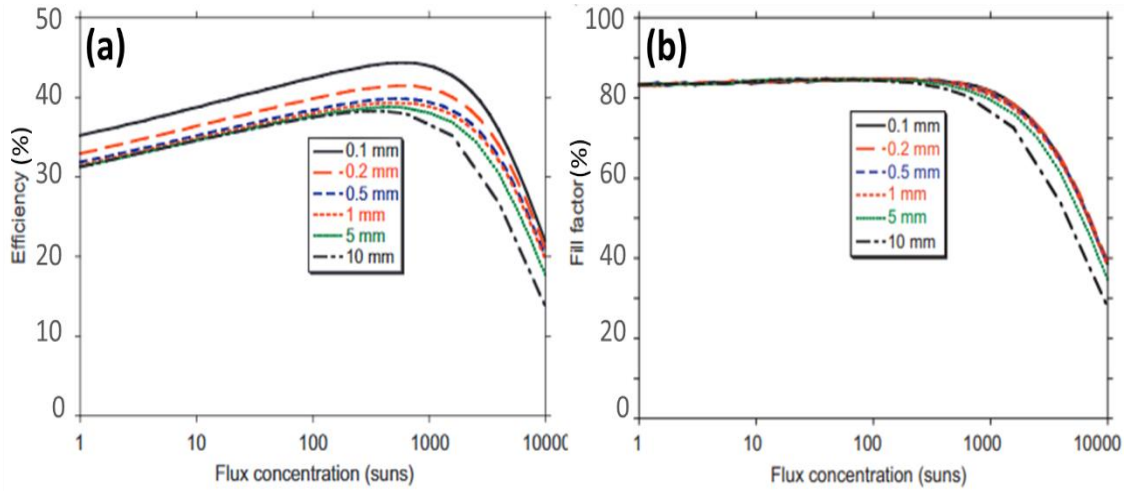


Figure 2-13 : (a) Évolution d'efficacité et (b) du FF, en fonction de concentration pour différentes valeurs de largeurs. La courbe est tirée du papier [71].

2.4 Vers une nouvelle approche de conception pour le CPV : cellules solaires à jonctions dupliquées

2.4.1 Description de l'approche

Dans les cellules MJ conventionnelles, le gain est principalement lié à la réduction des pertes par thermalisation et transmission grâce à la séparation du spectre solaire. Le gain par l'augmentation du V_{OC} , la réduction du J_{SC} ainsi que les pertes résistives associées ne représentent qu'une partie mineure du gain principal dans ce type de cellules.

Une alternative aux cellules MJ conventionnelles consiste à subdiviser chaque sous-cellule en plusieurs sous-jonctions de même énergie de bande interdite (c.-à-d. même matériau). L'architecture permet efficacement de réduire les pertes $R_s J_{SC}^2$ car le courant est réduit proportionnellement au nombre de jonctions [15]. Le gain en tension permet l'obtention des rendements de conversion élevés par rapport à une cellule conventionnelle. Théoriquement, l'efficacité de conversion η d'une cellule solaire peut être calculée à partir de l'expression [15]:

$$\eta = \frac{V_{oc} J_{sc} - R_s J_{sc}^2}{P_{IN}} \quad (2.10)$$

L'efficacité augmente avec le nombre de jonctions, mais aussi en augmentant le facteur de concentration X , car l'effet du terme $R_S J_{SC}^2$ devient de moins en moins critique si le nombre de jonctions et le facteur de concentration augmentent en parallèle.

La **Figure 2-14** illustre un exemple typique d'une cellule triple-jonction *dupliquée* où les trois sous-cellules sont subdivisées en N_1 (E_{g1}), N_2 (E_{g2}) et N_3 (E_{g3}) sous-jonctions. Ces dernières ont le même chemin optique et sont connectées électriquement en série par des jonctions tunnel. Contrairement au cas de MJ standard où chaque sous-cellule doit absorber la totalité des photons dont l'énergie est supérieure à la bande interdite, les sous-jonctions dans une cellule dupliquée sont conçues pour absorber et convertir la même fraction de photons totale et donc, produire le même courant dans toutes les sous-jonctions. En d'autres mots, les sous-jonctions d'une sous-cellule donnée sont partiellement transparentes et laissent passer une partie de leur portion du spectre vers les autres sous-cellules.

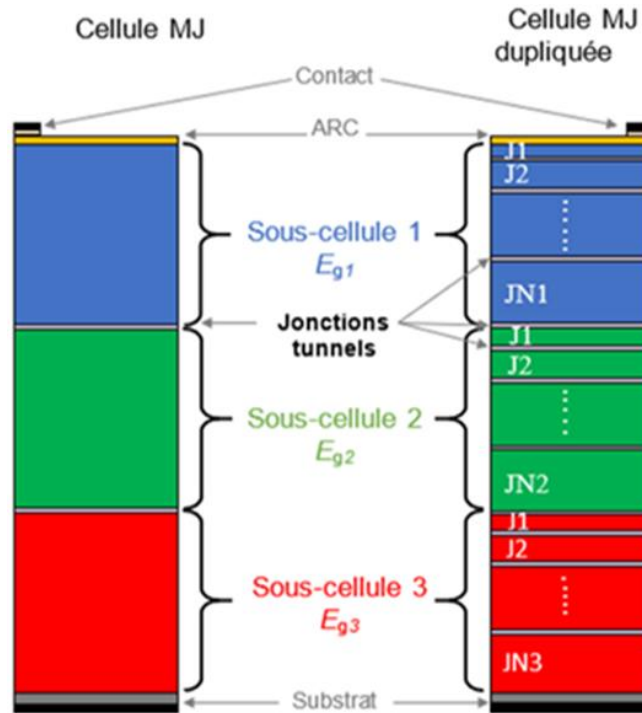


Figure 2-14 : Représentation schématique d'une cellule MJ et une cellule dupliquée (aucune échelle n'est considérée).

De cette manière, le courant et la tension totale de la cellule dupliquée s'écrivent :

$$J_{SC} = \min(J_{SC,0}^i / N_i) = \min(J_{SC,0}^j) \quad (2.11)$$

$$V_{OC} \approx \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{N_i} V_{OC}^j \quad (2.12)$$

$J_{SC,0}^i$ et $J_{SC,0}^j$ représentent, respectivement, les courants générés par la $i^{\text{ème}}$ sous-cellule dans la cellule de base et la $j^{\text{ème}}$ sous-jonction dans la cellule dupliquée. V_{OC}^j est la tension d'opération du $j^{\text{ème}}$ sous jonction dans la cellule dupliquée. Comme dans toutes les cellules MJ, le courant est limité par la sous-cellule qui génère le courant le plus faible. Dans cette configuration, les pertes résistives (P_{Joule}^X) à une concentration X sont réduites à:

$$P_{Joule}^X \approx \min [(X/N_i)^2 P_{Joule}^1] \quad (2.13)$$

Bien que les pertes résistives varient en X^2 , l'augmentation du nombre de sous-jonctions réduira les pertes résistives d'un facteur N_i^2 . Par conséquent, le concept est avantageux, surtout à très hautes concentrations.

Il est important de mentionner que le concept de jonctions dupliquées a été utilisé, dans notre équipe, dans les structures VEHSa (pour *Vertical Epitaxial Heterostructure Architecture*) pour des applications photoniques comme les transducteurs à laser monochromatique [73]–[76]. L'objectif de cette thèse est donc de poursuivre les efforts pour appliquer la technologie VEHSa au CPV [77].

2.4.1.1 Accord du courant

La duplication est aussi un moyen très efficace pour réaliser l'accord du courant. En sélectionnant un nombre optimal de sous-jonctions pour chaque sous-cellule dans une cellule MJ, nous pouvons partager d'une manière équilibrée le spectre solaire sur les différentes sous-jonctions. Dans ce cas, l'épaisseur de chaque sous-jonction doit être déterminée avec précaution pour convertir approximativement la même fraction de photons. À titre d'exemple, dans la triple jonction InGaP/GaAs/Ge, la sous-cellule de bas de Ge délivre généralement un courant deux fois plus élevé que celui généré par les deux cellules de InGaP et GaAs. Dans cette configuration, nous pouvons augmenter le nombre de sous-jonctions de Ge ($N_3 \geq 3$) par rapport aux cas de InGaP et GaAs ($N_1 = N_2 = 2$). Cette configuration permet d'améliorer le V_{OC} , réduire les pertes $R_S J_{SC}^2$ tout en maintenant

l'accord du courant sans nécessairement avoir besoin de rajouter d'autres matériaux en désaccord de maille.

2.4.1.2 Autres avantages du concept

En plus des avantages cités ci-dessus, la duplication des cellules solaires présente d'autres bénéfices :

- Les cellules dupliquées sont constituées de sous-cellules avec des couches *bases* plus minces. Par conséquent, elles peuvent générer des valeurs de V_{OC} légèrement plus élevées due aux pertes internes plus faibles, si la passivation est excellente.
- La quantité totale du matériau absorbant reste approximativement la même, donc, la résistance série totale devrait également être comparable à celle de la cellule de base. L'ajout des jonctions tunnel augmente normalement de manière négligeable la résistance série de la cellule dupliquée (environ $0.1 \text{ m}\Omega.\text{cm}^2$ par jonction tunnel). Cependant, comme mentionné dans la section 2.3.2, la réalisation des jonctions tunnel à large bande interdite peut être un défi.
- Puisque le coût de l'épitaxie dépend généralement de l'épaisseur totale de la cellule ou du temps de croissance associé, le coût de croissance des cellules dupliquées n'est pas très affecté par l'augmentation du nombre de couches. Cependant, en ajoutant plus de couches, il faut parfois ralentir le taux de croissance pour réaliser des interfaces de bonne qualité, mais la plupart des machines d'épitaxie sont optimisées pour obtenir de bonnes interfaces avec un taux de croissance maximal.
- La duplication n'ajoute pas de complexification ni de temps supplémentaire en épitaxie, car on n'introduit pas de nouveaux alliages complexes comme ce qui est cas dans les cellules MJ récentes[2], [34], [78].
- L'utilisation des cellules solaires dupliquées permet de réduire le nombre de cellules à mettre en série dans un panneau photovoltaïque. À titre d'exemple, en utilisant une cellule dupliquée qui génère un V_{OC} trois fois plus élevé qu'une cellule conventionnelle, il suffit de mettre trois fois moins de cellules en série pour générer approximativement le même V_{OC} total. La **Figure 2-15** montre qu'en utilisant les cellules dupliquées (le cas de GaAs), le nombre de cellules nécessaire pour générer 36 V dans un panneau est réduit à 12 cellules au lieu de 36 cellules. Si la cellule dupliquée peut fonctionner sous un facteur de

concentration trois fois plus élevée par rapport à une cellule standard, le courant généré par chacune des cellules est multiplié par trois et la puissance générée ($V_{oc}J_{sc}$) sera approximativement la même dans les deux configurations. Par conséquent, la capacité des cellules dupliquées à opérer à hautes concentrations permet de réduire le nombre de cellules nécessaires pour former un panneau tout en maintenant une haute performance et donc, un coût très bas.

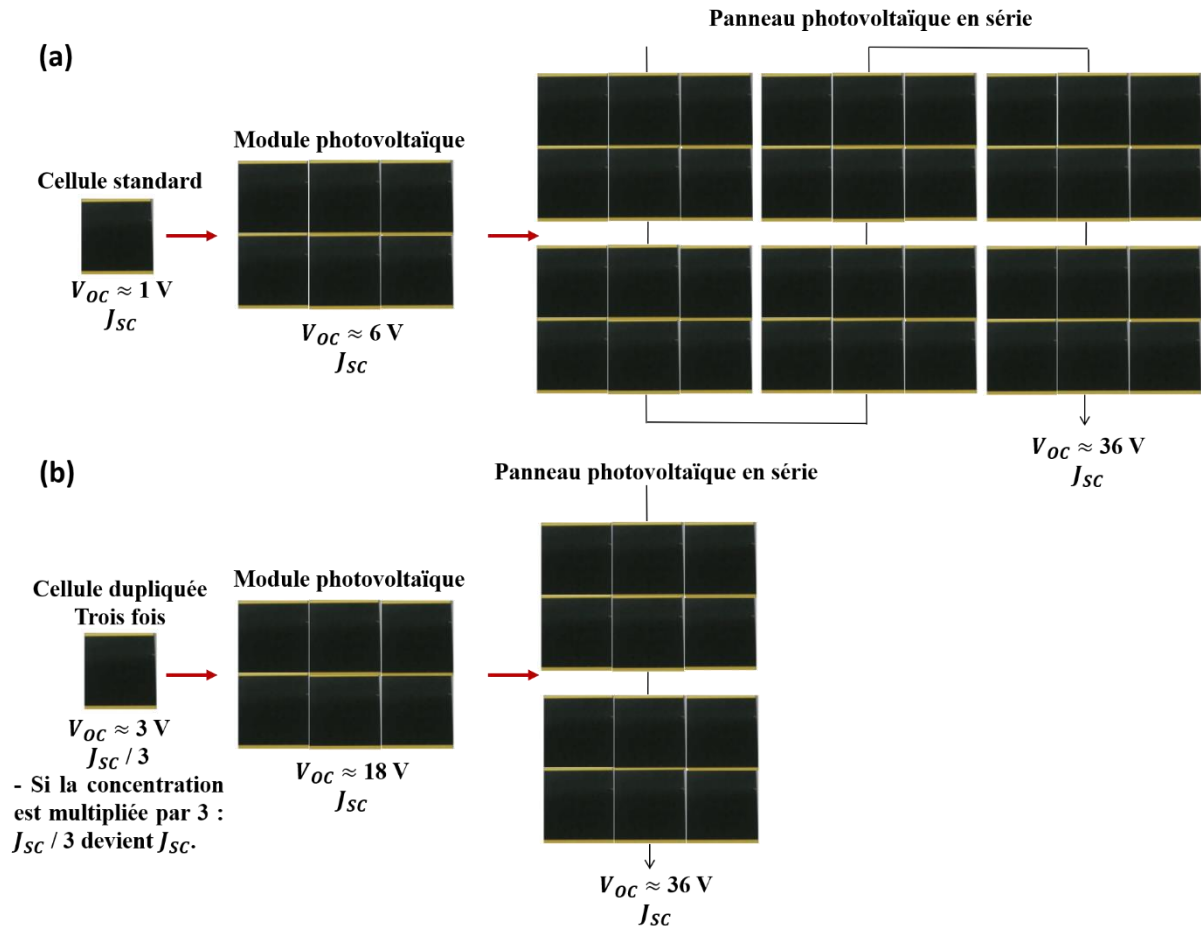


Figure 2-15 : Représentation schématique des panneaux photovoltaïques; (a) cas d'une cellule standard et (b) cas d'une structure dupliquée.

2.4.2 Cellule solaire à jonctions dupliquées Vs cellule MJ

Le concept des cellules solaires à jonctions dupliquées est applicable à toute technologie de cellule solaire pour augmenter ses performances à hautes concentrations. Le **Tableau 2-2** représente une comparaison des caractéristiques des cellules MJ et les cellules dupliquées.

Tableau 2-2 : Comparaison entre les cellules MJ et dupliquées.

	Cellules MJ	Cellules dupliquées	Avantages des cellules dupliquées
Accord du courant	Difficile	Facile	L'architecture rajoute un degré de liberté pour obtenir l'accord du courant à travers les sous-jonctions en optimisant leurs nombres et épaisseurs durant la croissance épitaxiale.
Pertes résistives $R_s J^2$	Élevées	Très ajustables	<ul style="list-style-type: none"> Bien que l'ajout des jonctions p-n, jonctions tunnels, etc., augmente relativement la résistance série, la réduction du courant permet de réduire significativement les pertes résistives $R_s J^2$. Typiquement, une sous-cellule dupliquée deux fois produira la moitié du courant généré par une cellule de base et donc 1/4 de pertes résistives.
Recombinaison	Élevée	Plus faible	L'amincissement des sous-jonctions réduira les recombinaisons [79]. Ceci améliore l'effet du recyclage de photons.
Rendement	Limitée	Élevée	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation du V_{OC} et réduction de $R_s J^2$; L'utilisation des sous-jonctions minces permet de maximiser la séparation du niveau de Fermi (<i>Fermi level splitting</i>), ce qui améliore le V_{OC} avec la concentration [80].
Coût	Élevé	Faible	<ul style="list-style-type: none"> Grâce à l'augmentation du facteur de concentration et le rendement de conversion; Cette technologie peut utiliser les processus de fabrication standards existant sur le marché, donc aucun coût supplémentaire à considérer.

Chapitre 3. CONCEPTION DES CELLULES SOLAIRES DUPLIQUÉES ET LEUR COÛT RELATIF

3.1 Avant-propos

Auteurs et affiliation :

Mohamed El-Gahouchi: doctorant, institut interdisciplinaire d'innovations technologiques (3IT), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1.

Mohammad Reza Aziziyan : post-doctorant, institut interdisciplinaire d'innovations technologiques (3IT), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1.

Richard Arès : professeur, institut interdisciplinaire d'innovations technologiques (3IT), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1.

Simon Fafard : professeur, institut interdisciplinaire d'innovations technologiques (3IT), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1.

Abderrauof Boucherif : professeur, institut interdisciplinaire d'innovations technologiques (3IT), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1.

Date d'acceptation : 13 mars 2020

État de l'acceptation : version finale publiée

Revue : Energy Science & Engineering

Référence : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ese3.692>

Titre en français : Récupération d'énergie rentable à ultra-hautes concentrations avec les cellules solaires dupliquées.

Contributions du document : Cet article montre, pour la première fois, le potentiel des cellules solaires dupliquées à augmenter le rendement électrique avec la concentration solaire. Le choix s'est porté sur ces deux structures; GaAs et la triple-jonction GaInP/GaAs/Ge; car elles dominent le marché du CPV pour la filière III-V. Le document présente aussi une description du modèle

physique utilisé ainsi qu'une discussion sur les matériaux considérés. Un modèle économique est présenté à la fin du document.

Résumé en français :

Les systèmes photovoltaïques concentrés sont parmi les technologies qui ont le potentiel de réduire le coût de l'énergie en augmentant l'efficacité. Dans ce sens, les pertes résistives sont les principaux facteurs qui limitent l'efficacité et la réduction du coût à des concentrations ultra-élevées. Dans ce travail, nous proposons et étudions de nouvelles architectures composées de cellules solaires à jonctions dupliquées. Cette approche peut alléger les pertes résistives. Les résultats de simulation basée sur la limite de Shockley-Queisser démontrent que les effets néfastes des pertes résistives sur l'efficacité de conversion à fortes concentrations peuvent être atténués avec ces nouvelles structures. Les structures modélisées sont composées de multiples jonctions des matériaux III-V (GaInP, GaAs et Ge) en accord de maille sur des substrats de GaAs ou Ge. Les résultats obtenus illustrent le potentiel des cellules dupliquées à améliorer l'efficacité des cellules solaires III-V sous hautes concentrations, dépassant 1000 soleils (eu utilisant le spectre solaire AM1.5D à 300K). Enfin, une analyse des coûts relatifs indique qu'une réduction de 30% est atteignable en utilisant ces nouvelles architectures.

3.2 Cost-effective energy harvesting at ultra-high concentration with duplicated concentrated photovoltaic solar cells

3.2.1 Abstract

Concentrated photovoltaic (CPV) systems are one of the few technologies that can provide cost reduction while offering efficiency improvement. In this respect, the resistive losses are some of the main limiting factors, which restrict the efficiency improvement and the cost reduction at ultrahigh concentrations (UHCs). In this work, we propose and investigate new designs consisting of duplicated junction solar cells. The approach can resolve the issues related to the resistive losses. Simulation results, based on Shockley-Queisser limit, demonstrate that the detrimental effects of series resistance losses in the degradation of efficiency at UHC factor can be mitigated with this strategy. The modeled structures are composed of multiple junctions of materials (GaInP, GaAs, and Ge), which are lattice-matched to Ge or GaAs. These results illustrate the potential of duplicated junction designs for enhancing efficiency of III-V solar cells under high concentrations,

exceeding 1000 suns (under AM1.5D solar spectrum at 300 K). Finally, a relative cost calculation indicates that more than 30% of cost reduction can be achieved using these designs at UHCs.

Keywords

Cost-effective, CPV, detailed balance limit, duplicated junction, multijunction cells, series resistance, ultrahigh concentration.

3.2.2 Introduction

To date, multijunction solar cells (MJSCs) based on III–V materials have provided the highest conversion efficiency compared to other photovoltaic technologies,[35], [81], [82] nevertheless there is still a lot of room for improvement [3], [81]. Particularly, III-V MJSCs are expensive, primarily due to the high cost of substrates suitable for epitaxial deposition of III-V films [38]; besides, manufacturing such multilayered structures can include additional microfabrication steps [83]. Currently, one of the most efficient methods that have been applied for reducing the cost of CPV systems is based on MJSC designs that can operate efficiently at UHC, around >1000 suns [3], [15], [36], [84]. It is expected that, in the near future, CPV systems become competitive for energy production market [13]. They are especially advantageous for high direct-normal irradiation (DNI) regions, but they are not yet attractive for mid-range and low DNI regions, where the limited acceptance angle impedes focusing the diffuse sunlight with the concentration optics [85], [86]. The main leverage of CPV solar cells, however, is reflected by the fact that they contribute to the cost reduction and the efficiency increase at the same time. For instance, in areas with a high annual DNI of 2000 kWh/m² or more, the levelized cost of electricity varies between €0.08/kWh to €0.15/kWh and the price of installing CPV power plant systems with a capacity of 10 megawatts would be between ~ €700/kWh to €1100/kWh, assuming that the installations continue to grow through 2030 [16]. Therefore, advanced architectures designed for UHC conditions are a powerful means of enabling MJSCs to be used not only in terrestrial applications but also in space applications, where watts per kilogram is a crucial requirement [87].

However, the performance improvement at UHC is strongly affected by three important factors, which are (i) the losses caused by the temperature increase in the solar cells (typically, about 63% of light is dissipated by generating heat in a GaInP/GaAs/Ge solar cell under concentrated light [64]), (ii) the lack of reliable optics (as a system of lenses or reflectors) ~~and trackers~~ that can support UHC conditions, and (iii) the existence of series resistance (R_s) that seems to limit the

efficiency at UHC when higher photocurrent levels are reached. To address the first issue, two main methods of thermal management can be used, which are active and passive cooling [88]. As an example of passive cooling, Saadah et al.[89] demonstrated that thermal management at concentrations above 500 suns can be improved by enhancing the properties of the thermal interface materials via incorporation of graphene. Concerning the second problem, several innovative optical configurations have been proposed, such as multiple Fresnel lens primaries focusing to one central cell, allowing to increase the concentration above 3000 suns with an optical efficiency of 55% [90]. Furthermore, P. Ferrer-Rodriguez et al. [91] designed a new ultra-high CPV module based on the Cassegrain design with four optical units around a central receiver, which can reach concentrations above 1000 suns. Concerning the last issue, it seems that the energy losses are not only sensitive to the device series resistance, but they are also susceptible to the photocurrent level [92]. To be more specific, it is the current density that turns it into the paramount hindering factor to the system performance. This is due to the fact that the resulting $R_s J^2$ power losses will scale with the square of current density [93]. Various strategies have been proposed in order to mitigate the unfavorable effect of the resistive losses, by reducing either the series resistance or the photocurrent level. In particular, grid design should be optimized to realize the optimal balance between the contact resistance, the front metal grid and the shading associated with the front contact metal grid [13], [18], [64]. Decreasing the cell size can also reduce the series resistance losses through a drop in the area-related contribution of the series resistance [94], [95]. Another alternative method consists of reducing the tunnel junction related series resistance using the highly conductive tunnel junctions that have a high current peak. In this regard, Barrigón et al. [96] reported a high peak current of 235 A/cm² for a transparent p⁺⁺- AlGaAs/n⁺⁺-GaInP tunnel junction architecture that will not electrically limit the functioning of CPV device in any practical concentration level. Furthermore, heterojunctions or band discontinuities seem to have an impact similar to that of the series resistance at high concentration levels. This can be mitigated by increasing the doping level, hence favoring the tunneling process of carriers through the potential barriers [17]. Another innovative design of solar cells consists of employing a vertical-tunnel junction. This approach allowed a significant reduction of series resistance losses in the two p-n junctions connected in series, thereby increased the efficiency from 22.5% at 1 sun to 28.4% at an extreme concentration of 15000 suns [14]. Even though these strategies allow a moderate improvement in the efficiency, they require extreme concentration levels that are not easy to attain

[17], [97]. In Table S1.1 (see Supporting Information, section S1), we compared some advantages and disadvantages of the different strategies, investigated in the literature, for reducing series resistance. On the other hand, using the concept of MJSCs, which involves a combination of multiple subcells with different bandgaps, seems to be a compelling route for reducing both the generated heat, by minimizing the thermalization losses [98], and the photocurrent [15]. This can be realized by splitting the solar energy spectrum over many junctions, hence significantly reducing the resistive losses power (J^2R_s) and; consequently, producing much useful power in the cell.

As examples of success in development of MJSCs at UHC, GaInP/GaAs dual-junction delivered an efficiency of 32% for concentrations ranging from 499 suns to 1000 suns [99]; in addition, $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}/(\text{In})\text{GaAs}/\text{Ge}$ three-junction showed an efficiency of 43.9% at 904 suns [100]. Nonetheless, the efficiency of these conventional cells drops drastically beyond a certain value of concentration, which is around 1000 suns and 904 suns for dual- and triple-junction solar cells, respectively. Recently, many researches have been directed towards developments of MJSCs operating above 1000 suns condition, subsequently module efficiency of above 35% has been reported [30], [101], [102]. Other technologies capable of improving the conversion efficiency of MJSCs have been successfully developed. For instance, researchers at National Renewable Energy Laboratory (NREL) implemented four-junction solar cells, grown as inverted metamorphic multi-junctions, with efficiency close to 45.6% at 690 suns [55]. Moreover, Friedman *et al.* [103] investigated high efficiency four-junction solar cells by introducing dilute nitride film. This group and others employed a layer of GaInNAs (~ 1 eV bandgap) between GaAs and Ge layers in the GaInP/GaAs/Ge structure. Such a design enabled equal distribution of solar spectrum over different junctions. As a result, thermalization and transmission losses in solar cells were minimized. Based on a semi-empirical model, they showed that the theoretical efficiency of GaInP/GaAs/Ge solar cells increased by 5% for AM0 at one sun and by 8% for AM1.5D at 500 suns [104]. Despite these outstanding achievements, design and fabrication of MJSCs with high conversion efficiency at UHC conditions is still an ongoing challenge that must be overcome, in order to establish a reliable and sustainable, yet cost-effective, platform for green energy production. Other complexity in MJSCs arises from the compatibility issue of same III-V materials, in terms of lattice constant, that can be included in the solar cell.

In this work, duplicated junction solar cells (DJSCs) that can operate efficiently at UHC conditions are studied. The key principle is duplicating a given subcell (p-n junction) into 2 or more (N) similar-bandgap sub-junctions, thereby creating the same optical paths that are electrically connected in series using low resistance tunnel junctions. Therefore, the optical input power can be converted into a high voltage, while maintaining current level sufficiently low, thus allowing efficient operation at higher concentrations. Furthermore, the DJSCs allow distributing the total current over multiple sub-junctions. The most important advantages of this approach are; firstly, the design can be applied to single junction solar cells as well as MJSCs and; secondly, there is no limit concerning the lattice constant compatibility, as the subcells of the same material will be duplicated. *York et al.* [77] have presented a preliminary study of the practicality of applying such designs to CPV cells, demonstrating their ability to operate at concentrations otherwise considered high or extreme for standard cells. They mentioned that using a transparent stack of thin sub-junctions in DJSCs leads to a maximum split of quasi-Fermi level that improves the V_{OC} with the concentration [105], thereby improve the cell performances. However, the impact on performance and cost reduction of such designs at high concentrations have not been investigated up to now. DJSCs is conceptually comparable to the multi-bandgap systems investigated by Law et al., [106] who demonstrated that such a design represents a very efficient strategy for achieving current matching, by selecting the suitable number of subcells.

Here, a detailed explanation of the simulation model, as well as calibration and validation of the employed model, is first presented. Then, the modeled performance of duplicated GaAs and GaInP/GaAs/Ge three-junction solar cells at UHC were compared with experimental data reported in literature. Advantages and limitations of the new designs as well as relative cost analysis for duplicated 3xGaInP/3xGaAs/3xGe three-junction solar cells are then discussed in detail.

3.2.3 Modeling details

Simulations were based on the detailed balance limit of efficiency (Shockley-Queisser limit) [25]. In these calculations, bandgap energies of materials and temperature were considered, whereas thickness, doping level, back-surface field (BSF) and window layers were not taken into account. For an ideal solar cell, Shockley-Queisser limit is based on certain assumptions as follows [107]:

- I. Each absorbed photon generates absolutely one single electron-hole pair.
- II. Absorption of photons with energy less than the material bandgap is null.

III. Only radiative recombination occurs within the cell and non-radiative processes (e.g., Shockley-Read-Hall and Auger) are neglected.

IV. The resistive losses are neglected; viz., mobility of carriers is infinite.

V. The cell temperature is equal to the ambient temperature (300 K).

A semi-empirical model was established by extending the detailed balance model in order to explicitly elucidate the impact of the resistive losses, caused by Joule effect in the electrical resistance, and the optical losses, resulted from reflection effects on the surface of the solar cells. For this purpose, a current correction factor was introduced to include the losses imposed by surface's reflections. As a matter of fact, this can be realized using anti-reflecting coating (ARC) films such as ZnO [108] and SiO₂/SiN [109]. Lastly, the proposed model was calibrated and verified by applying it to the known reference solar cells. Simulations were conducted in the following order :

1. The photocurrent of each p-n junction was calculated by integrating over the absorbed solar spectrum, assuming that each photon will create absolutely one electron-hole pair. Hence, photogenerated current density, J_g , became :

$$J_{g,k}(X) = X \frac{q}{hc} \int_{\lambda_k}^{\lambda_{k+1}} \lambda I(\lambda) d\lambda \quad (3.1)$$

Where X is the concentration factor, q is the electronic charge, h is the Planck constant, c is the speed of light, $I(\lambda)$ is the power density of the spectrum per wavelength λ , which is the AM1.5D spectrum in this case, and λ_k (λ_{k+1}) is the wavelength associated with the bandgap of the k^{th} ($(k+1)^{th}$) junction. It was assumed that for a stack of monolithic junctions, each junction “k” absorbs only a part of the spectrum. Namely, only the wavelength range between λ_k and λ_{k+1} were taken into account in the calculations (numbering starts at the illuminated side). The integration of “ $\lambda I(\lambda)$ ” was carried out by adopting a linear interpolation at the sampling points, referred to as “quick and dirty” method [25]. Hence, equation (3.1) was rewritten for the k^{th} junction as:

$$J_{g,k}(X) = X \frac{q}{hc} \sum_{i=k}^{i=k+1} \lambda_i (\lambda_{i+1} - \lambda_i) I(\lambda_{i+1}) \quad (3.2)$$

The sum is on all wavelengths λ_i between λ_k and λ_{k+1} . Then, the full-device J_g was determined through $J_g(X) = \min (J_{g,k}(X))$.

2. When the subcells were duplicated, assuming that each absorbed photon generates one single electron-hole pair, each sub-junction was considered partially transparent. Therefore, each sub-junction could transfer a fraction of its photocurrent to the underling sub-junctions, allowing to utilize the photocurrent sharing scheme as an indicator of current preservation [15], [77]. This fraction was calculated iteratively until the photocurrent of each sub-junction was almost equal and photocurrent was stabilized. In either case the total photocurrent is conserved, because it represents the total number of absorbed photons. In the real case, thickness of each sub-junction could be tuned in a way that it would absorb and convert the same fraction of the total light flux, which was normally converted in the corresponding sub-junction prior to duplication. On this subject, as reported by Čičić *et al.* [110], the data yielded by Beer-Lambert law and genetic algorithm studies provide convincing evidence that the thickness of the topmost subcell should become smaller when the number of the subcells with similar bandgaps increases.
3. Radiative recombination current was calculated, for each subcell, assuming the cell was at a radiative equilibrium with its environments, as follows [45][25][15]:

$$J_0(V) = \frac{2\pi q}{h^3 c^2} (n_u^2 + n_l^2) \int_{E_g}^{\infty} E^2 \frac{1}{\exp\left(\frac{E - qV}{k_B T}\right) - 1} dE \quad (3.3)$$

where J_0 is the radiative recombination current, k_B is the Boltzmann constant, T is the temperature, E_g is the bandgap energy, n_u is the refractive index of the upper layer, n_l is the refractive index of the lower layer and V is the applied voltage. To minimize radiative losses, in all calculations performed in this paper, it was assumed that there was air on one side and a mirror on the other side ($n_u=1$ and $n_l=0$). Moreover, the integral was simplified by neglecting the term “-1” (this approximation is only valid for $E - qV \gg k_B T$ [25]) as follows:

$$J_0(V) = q \left[\frac{2\pi}{h^3 c^3} (k_B T)^3 \right] \exp\left(\frac{qV - E_g}{k_B T}\right) \left[\left(\frac{E_g}{k_B T}\right)^2 + 2 \left(\frac{E_g}{k_B T}\right) + 2 \right] \quad (3.4)$$

4. The J-V data for each sub-junction “k” was calculated by the subtraction $J(V) = J_{g,k}(X) - J_0(V)$ for a given concentration factor X.

Furthermore, for any set of N series connected subcells, the total open-circuit voltage was calculated from the summation of the subcells’ voltage at this current:

$$V_{oc} = \sum_{i=1}^N V_i(J = 0) \quad (3.5)$$

Then, the maximum power per surface unity was calculated by taking the lowest current density value, as follows:

$$P_{max} = JV_{oc} - R_S J^2 \quad (3.6)$$

Where “ $R_S J^2$ ” represents the power loss caused by Joule effect. Note that the total series resistance associated with the front contact (1.93 m Ω .cm² for GaAs solar cell at 1000 suns) is the dominant term in the overall series resistance of the device and it is around $R_S=3.04$ m Ω .cm² [47]. In addition, the series resistance is mainly influenced by the solar cell size [19]. Carlos Algorta *et al.* [19] measured the electrical resistance of $2 \times 10^{-3} \Omega$ for a 1cm x 1cm GaAs solar cell at 1000 suns; that is, $2 \times 10^{-7} \Omega$.m².

5. Finally, the efficiency $\eta(X)$ was calculated from the ratio $\frac{P_{max}}{P_{in}}$, where P_{in} is the power of the incident light.

3.2.4 Material considerations

The designs mostly consisted of three materials, including In_{0.5}Ga_{0.5}P ($E_g \sim 1.89$ eV), GaAs ($E_g \sim 1.42$ eV) and Ge ($E_g \sim 0.67$ eV) [111]. All these materials have been well developed and they have been already used in solar cells. Composition of the ternary In_{0.51}Ga_{0.49}P was chosen, as it is lattice matched with both GaAs and Ge substrates [111]. **Figure 3-1** shows solar cell designs based on GaAs and three-junction InGaP/GaAs/Ge solar cells. For both solar cells, each subcell was divided into N sub-junctions with similar bandgap (from two to five sub-junctions).

In solar cell design, diffusion length is a critical parameter and it must be essentially longer than the solar cell thickness to ensure a favorable performance. In the case of DJSCs, most sub-junctions will be thinned, by design, to make them transparent to a part of the spectrum; as a consequence, unabsorbed photons could be transmitted to the underneath sub-junction. Since for all sub-junctions the thickness will be much less than 1 μ m, except the bottom sub-junction thickness, materials with diffusion length around 1 μ m are largely sufficient to distribute the

current equally between all the sub-junctions [112]. The diffusion length is related to the carrier lifetime and diffusivity according to the following equation:

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (3.7)$$

where L is the diffusion length, D is the diffusivity, which is proportional to the carrier mobility, and τ is the carrier lifetime. As for InGaP, Schultes *et al.* [113] measured electron diffusion length of 0.9 μm for hole concentration of $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Moreover, they reported that the hole diffusion length in n-GaAs layers is 7 μm with an electron concentration of $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Mintairov *et al.* [114] measured minority carrier diffusion lengths in photoactive III–V layers of solar cells. They reported that electron and hole diffusion lengths of p-Ge and n-Ge layers were, respectively, 5 μm and 0.4 μm with carrier concentration of $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

From a thermal point of view, the V_{oc} can also be affected by the temperature of a solar cell, because according to the Varshini's law [115] bandgap energy of semiconductors decreases when the temperature increases. Based on equation (3.4), a little variation in the bandgap energy considerably affects the radiative recombination current. In addition, the changes in voltage can also be a result of radiative as well as non-radiative recombination processes of the charge carriers. The radiative process, however, can improve the solar cell performance through photon recycling effect [116][117]. Walker *et al.* [116] showed that the photon recycling for a GaAs solar cell increases the V_{oc} by 1.8% compared to a cell with no photon recycling. Proulx *et al.* [117] demonstrated experimentally the photon recycling effects on the performance of a thin GaAs n/p junctions, which was monolithically integrated in high-photovoltage VEHSAs devices. They observed an ultra-high efficiency exceeding 60% for very high input power of 5.87 W. The broader spectral response of the high efficiency was obtained due to the strong photon coupling effects.

Compared to classical solar cells, the DJSCs have a positive impact on the generated heat flux. In fact, the internally resistive heating in the solar cell decreases when the subcells are duplicated, because the generated current density decreases by a factor N [118]. On the other hand, the generated heat by thermalization of carriers is not affected, since bandgap of semiconductor materials does not change when the subcells are duplicated [119].

experimental measurements; hence they validated the parameters that were adopted in the simulations of this work. The reasonable agreement between measured and simulated efficiencies enabled extraction of the material properties relevant to the electrical component of the simulation; i.e., series resistances as well as optical reflectance. The small differences are related to other limiting factors that were not considered in calculations presented here. It is important to mention that the series resistance was chosen with the intention of reaching higher concentration factor for which the efficiency is maximum (X_{peak}) close to that of experimentally obtained data. The value of the series resistance was set to $3.04 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ and $6.75 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ for single GaAs and TJ GaInP/GaAs/Ge, respectively. These values of resistances are consistent with experimental measurements reported by Algara *et al.* [47]. Furthermore, in order to reach the efficiency values close to those of the experimental data, a current factor correction was introduced to include optical reflectance. For that purpose, it was assumed that only $\sim 20\%$ and $\sim 35\%$ of photons were reflected for single and three-junction solar cells, respectively. These values are consistent with the reported data in ref. [121], considering no ARC layer was applied on the solar cells. However, the reflectivity can be decreased almost 2.8% using the ARC, which can substantially improve the solar cell efficiency.

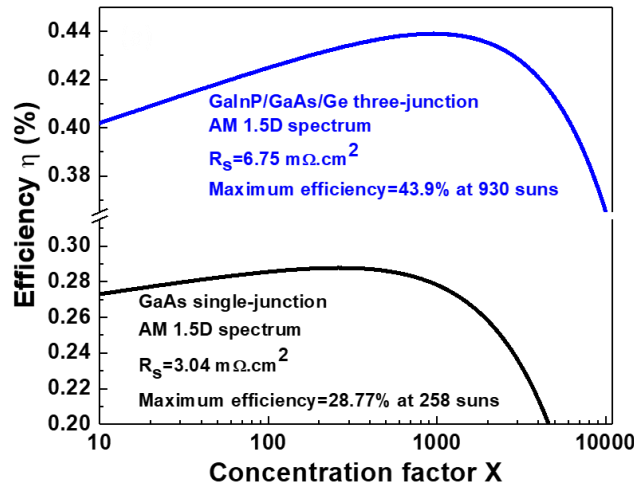


Figure 3-2 : Efficiency versus concentration curves for standard GaAs and GaInP/GaAs/Ge solar cells.

Tableau 3-1 Comparison between characteristics of real devices, provided by NREL and Fraunhofer, and simulation results reported here.

		X_{peak} (suns)	η (%)	Voc (V) at 1 sun	J (mA/cm ²) at 1 sun
GaAs single junction	Fraunhofer ISE	232	28.8	0.92	21.3
	This manuscript	258	28.7	1.14	22.6
Three-junction GaInP/GaAs/Ge	NREL	942	44.0	2.90	12.5
	This manuscript	956	43.9	3.13	12.2

3.2.5.2 Performance of duplicated GaAs and GaInP/GaAs/Ge three-junction solar cells at UHC

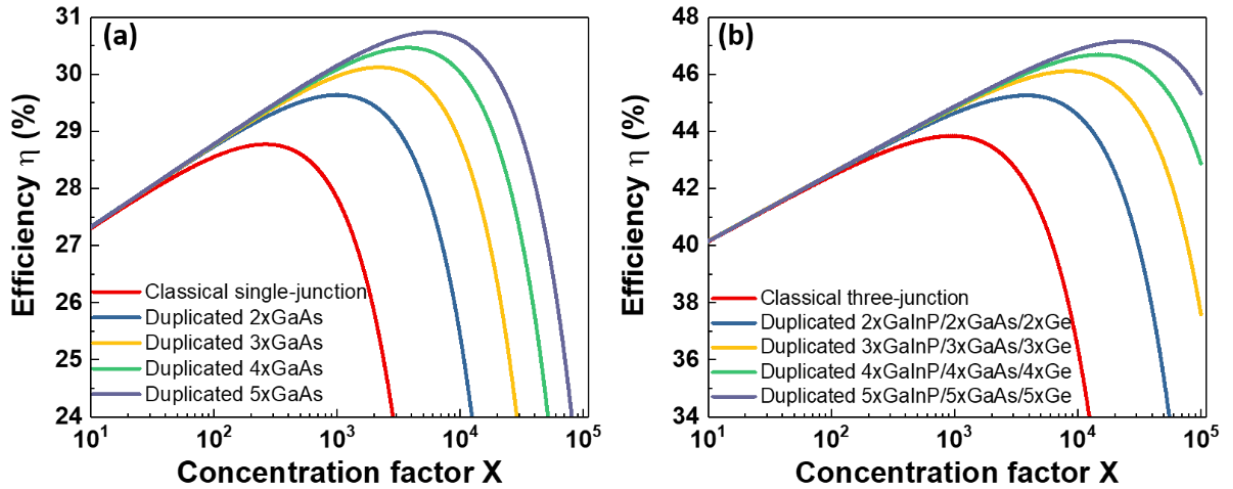


Figure 3-3 : Calculated efficiency for duplicated single-junction GaAs (a) and duplicated three-junction InGaP/GaAs/Ge (b).

As can be seen in **Figure 3-3**, the duplicated designs have efficiency peaks at higher concentration factors and present a slower drop in efficiency for increasing concentration, compared to classical single-junction GaAs and three-junction GaInP/GaAs/Ge solar cells. In the case of GaAs DJSCs, the series resistance was calculated according to the equation developed for AlGaAs/AlGaAs based tunnel junctions, as follows [47]:

$$R_s(\text{m}\Omega.\text{cm}^2) = 3.04 + 0.17 \times N \quad (3.8)$$

where $N (\geq 2)$ represents the number of sub-junctions. However, the series resistance was kept equal to $6.75 \text{ m}\Omega.\text{cm}^2$ for all duplicated three-junction, as there has been no report discussing variation of series resistance as a function of p-n junction's number. Nonetheless, the total thickness of absorbing material will be approximately the same for both duplicated designs (typically $\sim 0.65 \text{ }\mu\text{m}$ for GaInP, $\sim 3.1 \text{ }\mu\text{m}$ for GaAs and $\sim 100 \text{ }\mu\text{m}$ for Ge, including Ge substrate thickness [122]), thus it is compelling to consider that their total series resistance should also be comparable.

The drops of efficiencies, when the concentration factor increases, are related to the resistive losses [17]. In fact, the series resistance, which does not affect the efficiency at low concentration, becomes a significant problem at high concentration. As can be seen in **Figure 3-3**, the efficiency of classical single-junction GaAs cell dropped drastically for concentration factors beyond 258 suns and varied from 28.8% at 258 suns to 26.9% at 1500 suns. Whereas, the efficiency of duplicated GaAs cells was maintained at high levels and increased for concentration factors beyond 258 suns. For instance, the maximum efficiency increased by 0.9%, 1.3%, 1.7% and 2.0% for 2xGaAs, 3xGaAs, 4xGaAs and 5xGaAs, respectively, compared to classical solar cells.

In the case of duplicated GaInP/GaAs/Ge three-junction, the efficiency of the conventional solar cell considerably dropped for concentration factors beyond 956 suns and varied from 43.9% at 930 suns to 42.9% at 3000 suns. As shown in **Figure 3-3**, efficiency of GaInP/GaAs/Ge DJSCs reached 45.3% at ~ 3700 suns for 2X DJSCs, 46.1% at ~ 8300 suns for 3X DJSCs and 46.7% at $\sim 15\text{k}$ suns for 4X DJSCs. Hence, these results demonstrated the potential of the new designs for enhancing efficiency at UHC conditions. It is relevant to mention that the most effective operating point in terms of cost reduction is not necessarily at maximum efficiency, alternatively operating at higher concentration with a maximum possible efficiency is economically attractive.

In good agreement with ref. [123], the presented results showed that, similar to multigap systems concept, the more the number of the sub-junctions increases the more efficiency increases. However, increasing duplication steps more than five times does not provide significant enhancement of efficiency. In addition, this may impose some issues; for instance, difficulty in

controlling flow of gases during growth steps and complexity of the manufacturing process during microfabrication steps, that cannot be compensated by efficiency improvement.

According to equation (3.6), the DJSCs are less affected by the concentration level compared to classical solar cells, because their delivered power is maximized as a result of the small generated photocurrent. Furthermore, these new designs are attractive for several applications that require high V_{OC} such as lightweight solar battery chargers [124]. The presented simulations showed that the output V_{OC} delivered by 3xGaAs and 3xGaInP/3xGaAs/3xGe, at one sun, was ~ 3.3 V and ~ 9.2 V, respectively. It is important to mention that V_{OC} increases roughly as a function of the logarithm of concentration factor, for concentrations lower than the efficiency peak position (X_{peak}) [64]. In fact, efficiency is theoretically proportional to the logarithm of concentration factor [13] and efficiency peak position moves to high concentration according to the following equation:

$$X_{peak, duplicated} = X_{peak, classical} \frac{R_{S(classical)}}{R_{S(duplicated)}} N^2 \quad (3.9)$$

$N(\geq 2)$ represents the total number of sub-junctions in the whole device. Equation (3.9) indicates that the X_{peak} for DJSCs is more sensitive to changes of N , compared to variations of series resistance. This is considered as an important advantage for DJSC designs.

Correspondingly, it can be deduced that there is a competition between these two different phenomena. For values lower than X_{peak} , the efficiency increases, because it is limited by the number of absorbed photons and, generally, more concentrated light is required to generate more electron-hole pairs. In such a condition, the DJSCs are more advantageous in terms of photon absorption and, subsequently, increasing V_{oc} and efficiency. For values more than X_{peak} , the resistive losses become dominant. These new designs provide high tolerance to the series resistance negative effect by minimizing the current density while increasing the V_{OC} and efficiency.

The efficiency and the power resistive loss for both GaAs and InGaP/GaAs/Ge DJSCs are displayed in **Figure 3-4**. As it can be seen in **Figure 3-4** (a) and **Figure 3-4** (c), when the subcells were duplicated the efficiency at one sun increased very slightly. Therefore, these new designs do not provide more benefits in terms of efficiency for very low concentrations. Moreover, classical solar cells have significantly low efficiencies at UHCs. Typically, the efficiency in the case of classical GaAs solar cell decreases by $\sim 2\%$ in the concentration range from 258 to 1500 suns. A

reduction of $\sim 1.3\%$ can be observed for GaInP/GaAs/Ge solar cell in the concentration range from 956 to 3000 suns. This can be explicated using the results shown in **Figure 3-4 (b)** and **Figure 3-4 (d)**, which show much higher power losses ($R_s J^2$) at high concentrations for the classical solar cell structures.

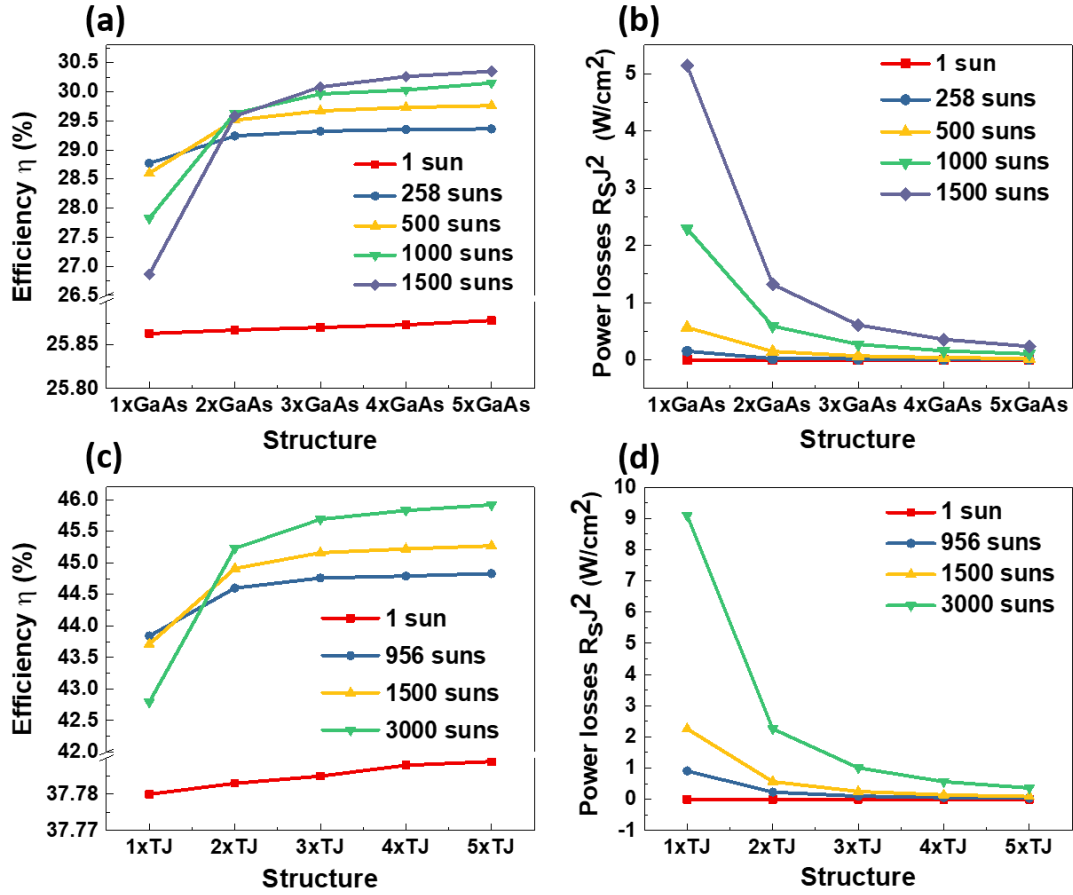


Figure 3-4 : Calculated efficiency and power resistive loss for GaAs DJSCs (a) and (b), as well as, InGaP/GaAs/Ge DJSCs (c) and (d).

On the other hand, the efficiency of 2xGaAs as well as 3xGaInP/3xGaAs/3xGe DJSCs increased significantly for high concentration factors. Besides the fact that the term $R_s J^2$ is proportional to X , it decreases by $(1/2)^2 = 1/4$ that allows to boost the efficiency at much higher concentrations than that of classical solar cells. Furthermore, in the case of duplicated designs with three or more repetitions the efficiency remained almost constant at a given concentration. According to **Figure 3-4**, the DJSCs have very low resistive losses compared to the classical solar cell. In this respect, there are considerable differences between the power losses at one sun and at UHCs. Typically, there is a difference ratio of $\frac{\Delta P_{loss}(5XGaAs)}{\Delta P_{loss}(1XGaAs)} = 4.6\%$, between one sun and 1000 suns in the case of

GaAs cells and $\frac{\Delta P_{loss}(5TJ)}{\Delta P_{loss}(1TJ)} = 4.0\%$, between one sun and 3000 suns in the case of three-junction cells.

Given that the duplicated designs require a higher number of individually deposited layers with inevitably increased number of gas-source switches during epitaxy growth, control of thickness and doping levels could become complicated. In addition, as expected, the efficiency remained almost unchanged for solar cells duplicated more than three times. These results provide confirmatory evidence that more than three-time duplication does not offer significant advantages, especially in terms of efficiency and in view of the high level of concentration required. Simulation results for more than five-time duplication are presented in the supplementary information (**section 3.2.8**).

As previously mentioned, the feasibility of developing high concentrator photovoltaic systems is possible and concentration factors above 3000 suns can be attained [90]. Therefore, the high-concentration levels required for efficient performance of the three times duplicated solar cells are attainable.

3.2.5.3 Cost analysis of duplicated three-junction

The relative cost is a qualitative measure of the rate by which the cost of energy per watt (W^{-1}) increases or decreases in comparison with a reference system. A simplified model of the impact of the concentration factor on the CPV system costs was performed. This model was based on the cost estimates for the components of a commercial FLATCON CPV system that was optimized for 500 suns [3]. Vossier *et al.* [13] estimated the relative cost using the flowing equation:

$$C(X) = \left(C_1 \frac{X_{opt}}{X} + C_2 + C_3 \cdot n \frac{\ln\left(\frac{X}{X_{opt}}\right)}{\ln(2)} \right) \frac{\eta(X_{opt})}{\eta(X)} \quad (3.10)$$

where C is the relative cost for produced energy per watt, X_{opt} is the optimal concentration factor at which the costs C_1 , C_2 and C_3 were estimated. This equation is only valid for concentration factors above X_{opt} . C_1 is the cost of the solar cell and its assemblies, and it represents 36.6% of the total cost of the system. This cost decreases with efficiency when the concentration factor increases. C_2 is the cost of electronics, modules assemblies and other indirect costs, and it represents 37.8% of the total cost. Although C_2 depends only on the efficiency or produced

electrical power, it depends implicitly on the concentration factor as well, because efficiency varies with concentration factor. C_3 is the cost of optics and trackers and it represents 25.6% of the total cost. Since DJSC designs are intended to operate at UHC factors, C_3 might increase. Here, four different cases were considered in calculations: C_3 increases by 0% ($n=1.0$), 10% ($n=1.1$), 20% ($n=1.2$) and 30% ($n=1.3$) every time the concentration factor is doubled. In the case of 0%, C_3 is independent of concentration factor. The optimal concentration X_{opt} was set to 956 suns for which the relative cost of the reference system was set to $C(X_{opt})=1$. The efficiency of the three-junction solar cell was used as a reference for $\eta(X_{opt})$.

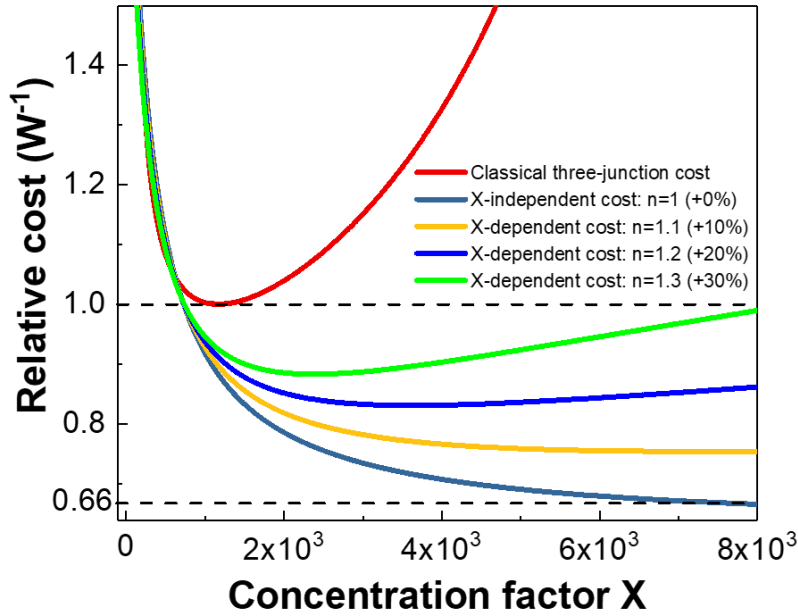


Figure 3-5 : Relative costs of the electricity produced by classical 3J, and duplicated 3xGaInP/3xGaAs/3xGe. 0%, 10%, 20% and 30% represent the fractions by which the cost C_3 was increased each time the concentration factor is doubled.

The relative costs for classical and duplicated 3xGaInP/3xGaAs/3xGe solar cell were calculated as a function of concentration factor are illustrated in **Figure 3-5**. As expected, the classical three-junction solar cells were not designed to operate at UHC factors. Cell cost C_I was highly affected by the drastic drop in the efficiency for concentrations above 956 suns. Although several strategies were proposed in the literature to retain the efficiency up to several thousand suns, the efficiency could not reach values, which were high enough to reduce the cost at UHCs [125][3]. In order to estimate the cost gains that would result from duplicated 3xGaInP/3xGaAs/3xGe solar cells, the relative cost for the four different cases were drawn, using the reported $\eta(X)$.

It is worth noting that if the costs of optics and tracking could be concentration independent (similar to the case of 0%), the DJSC leads to cost reduction at high concentration compared to classical three-junction. As can be seen in **Figure 3-5**, if 0% case is applied, the energy cost reduction will approach ~21.5% at 2000 suns and ~31% at 5000 suns for 3xGaInP/3xGaAs/3xGe. The obtained optimal values of concentration factor in this case are above 5000 suns for which the total cost approaches 0.66 W^{-1} . The cost reduction reported here is a major achievement for CPV systems. The same behavior was observed for the 10% and 20% cases, which were more realistic. In fact, a reduction of energy cost in the range 22-25 % was expected for concentrations ranging from 3000 to 8000 suns. Even assuming that the optics and tracker costs increase drastically with increasing concentration factor (30% case), about 12% of reduction in energy cost can be achieved from operating at concentration of about 2400 suns. This gain, enabled by DJSCs, is the consequence of operating at UHCs, which allows producing efficiently more energy per cell. Nevertheless, the optimal values of concentration become increasingly smaller when the optics and tracking costs were supposed to increase (from $n=1.0$ to $n=1.3$). In fact, C_3 is more sensitive to the concentration increase than other costs augmentations.

It can be concluded that the resulting total cost is more affected by both the cost of the cell and the cost of the optics and trackers. Given that III-V solar cells are more expensive than Si-based systems, increasing the concentration factor while keeping high efficiency seems to be an efficient strategy for minimizing the cell cost contribution in the total system cost. Moreover, reducing sensitivity of optics and tracking costs to the concentration factor increases allows reduction of electricity cost produced by CPV. In this prospect, one can also believe that this technology has significant potential to benefit from diffuse sunlight, making CPV/PV hybrid technology more competitive by combining the high performance of DJSCs at UHC and the low costs of flat-plate PV systems [126].

3.2.6 Conclusion

In this paper, duplicated GaAs and GaInP/GaAs/Ge concentrator solar cells, designed to operate efficiently at concentrations above 1000 suns, have been proposed and modeled. Simulation results showed that these designs can operate at UHCs while maintaining a high efficiency. This is because of maintaining generated photocurrent at lower levels compared to classical solar cells. Hence, DJSCs are less affected by resistive losses. Furthermore, contrary to most commercially

available solar cells, DJSC technology gives a new degree of freedom for designing cells that can withstand the elevated V_{OC} values.

The relative cost calculation for 3xGaInP/3xGaAs/3xGe have been performed. Compared to classical GaInP/GaAs/Ge solar cells, a reduction over 31% could be attained if the concentration increase does not impose extra costs. The DJSC technology does not require product redesigns, in terms of materials, surface area, microfabrication system, etc., and the same geometries can be added to any existing solar cell product line to boost the system performance at UHCs. However, one remaining technology challenge for the successful implementation of the DJSC is the development of high-bandgap tunnel junctions capable of operations at UHCs and with good optical transparency. Accordingly, further works will be focused on the optimization of duplicated cell architectures, using finite element methods, while including doping level and thickness of each layer. In the light of the presented findings, it is also intriguing to investigate the performance of other duplicated MJSC architectures under UHCs; for example, inverted metamorphic, wafer bonded and dilute nitride multijunction solar cells. On the basis of the results presented here, it is reasonable to suggest that these new designs give the possibility of using CPV systems in certain regions with mid-range and low DNI as well as high DNI, making CPV technology accessible in a very large scale. An additional benefit of these CPV systems, however, will be the reduction of the amounts of rare and toxic materials used to grow these cells, hence preserving the natural resources existing on earth.

3.2.7 Acknowledgements

The authors would like to thank A. B. Pougoué Mbeunmi, T. M. Diallo, R. Arvinte, and M. Jellite for scientific discussions, H. Pelletier and G. Bertrand for technical helps, the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), and the Fonds de Recherche du Quebec-Nature et Technologies (FRQNT) for financial support. The authors would like to thank also Saint-Augustin Canada Electric Inc. (STACE) and CMC microsystems for their assistance.

3.2.8 Supporting information: Above five-time duplication of single-junction GaAs and three-junction GaInP/GaAs/Ge

Figure 3-6 and **Figure 3-7** show the efficiency curves for more than five-time duplication of, respectively, GaAs and GaInP/GaAs/Ge solar cells. It can be seen that the efficiency values are

close to that of the structures studied in the main manuscript, even though the number of subjunctions is increased. This is because of the high losses, in terms of delivered power. In fact, when the cells are duplicated more than five times, for the range of concentration studied in this work, the excessive resistive losses cancel out the increased efficiency. These results are consistent with the findings of Čičić *et al.* [110]. They applied a heuristic method based on the genetic algorithm (GA) and they considered all relative phenomena including the radiative recombination, the diffusion dark current, Auger and Shockley-Read-Hall nonradiative recombination. The consensus view seems to be that in VEHSA structure the efficiency is almost unchanged or gradually reduced, whenever the number of subcells with similar bandgaps exceeds five.

Furthermore, several-time duplication can add some complications during the epitaxial growth of semiconductors. For instance, deposition of ultra-thin top subcells will be a challenge, specifically in terms of controlling layers' thickness and doping profile within these layers. Čičić *et al.* [110] used both Beer-Lambert law and GA method and reported that the thickness of the topmost subcell should become increasingly smaller when the number of the subcells with similar bandgaps increases. Besides, York *et al.* [77] showed that in VEHSA structure the doping level should be well optimized, to adjust the carrier lifetimes, then the open-circuit voltage can be increased.

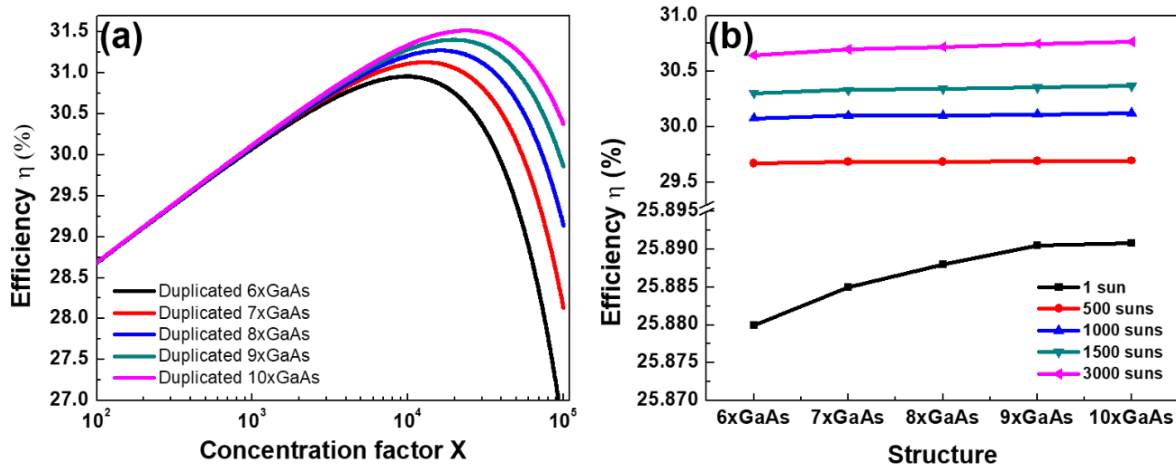


Figure 3-6 : Calculated efficiency for GaAs DJSCs versus concentration factors (a) and structure (b).

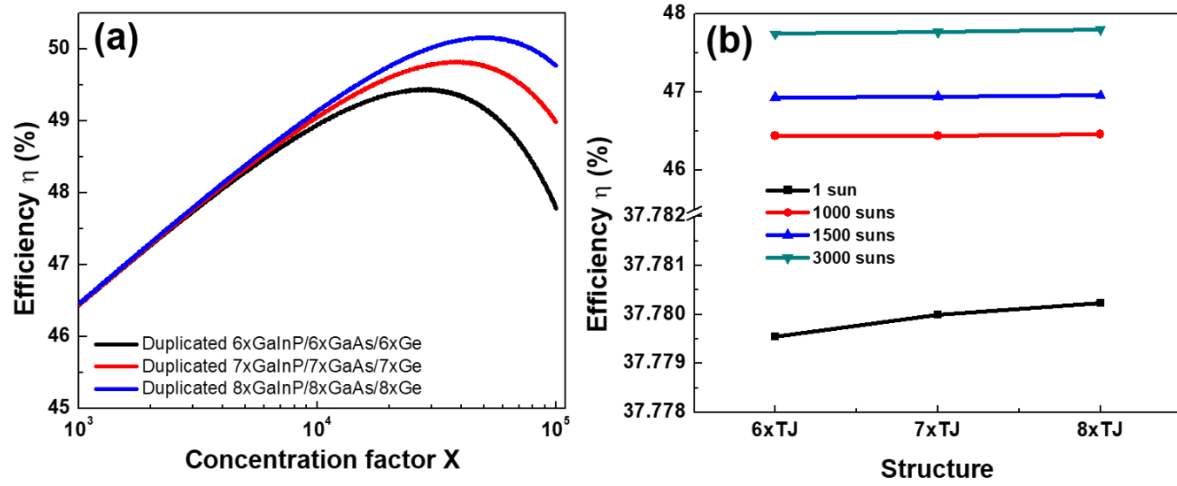


Figure 3-7 : Calculated efficiency for GaInP/GaAs/Ge DJSCs versus concentration factor (a) and structure (b).

Chapitre 4. VALIDATION DU CONCEPT ET SIMULATION D'UNE CELLULE SOLAIRE DUPLIQUEE A TROIS JONCTIONS DE GAAS

4.1 Avant-propos

Auteurs et affiliation:

Mohamed El-Gahouchi: doctorant, institut interdisciplinaire d'innovations technologiques (3IT), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1.

Mohammad Reza Aziziyan : post-doctorant, institut interdisciplinaire d'innovations technologiques (3IT), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1.

Richard Arès : professeur, institut interdisciplinaire d'innovations technologiques (3IT), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1.

Abderrauof Boucherif : professeur, institut interdisciplinaire d'innovations technologiques (3IT), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1.

Date de soumission : 15 mai 2020

État de l'acceptation : Accepté

Revue: American Institute of Physics (*conférence CPV16*)

Titre en français: Optimisation des cellules solaires dupliquées : une nouvelle approche pour produire de l'énergie sous fortes concentrations.

Contributions du document : Cet article valide expérimentalement le concept des cellules solaires dupliquées à travers une cellule à trois jonctions de GaAs (ou 3xGaAs) fabriquée et caractérisée. Le document contribue aussi à optimiser une cellule solaire 3xGaAs via une simulation physique par Silvaco Atlas en vue de prévoir leurs performances en fonction de la concentration solaire.

Résumé en français : La présente étude démontre le potentiel de l'approche des cellules solaires dupliquées pour surmonter les limites imposées par les pertes résistives dans les systèmes photovoltaïques sous concentrations. Le concept proposé consiste à subdiviser chaque sous-cellule d'une cellule solaire en plusieurs sous-jonction p-n transparentes, permettant ainsi d'augmenter la

tension d'opération, de réduire le courant délivré et les pertes résistives associées. Le concept est validé expérimentalement par la caractéristique courant-tension d'une cellule 3xGaAs à un soleil. Ainsi, les données expérimentales ont été utilisées pour calibrer notre modèle théorique, basé sur la méthode des éléments finis, afin d'analyser l'impact du nouveau concept sur l'amélioration du rendement sous fortes concentrations. Les résultats de simulation par le logiciel Silvaco Atlas montrent que la cellule 3xGaAs peut produire une efficacité maximale d'environ 33% sous 3500 soleils en utilisant le spectre AM1.5D à 300K.

4.2 Optimized duplicated-junction solar cells: an innovative approach for energy harvesting at ultra-high concentrations

4.2.1 Abstract

The present study demonstrates the potential of duplicated-junction solar cell approach to overcome the limit imposed by the resistive losses in concentration photovoltaic systems. The proposed design consists of subdividing each subcell of the solar cell architecture into multiple, optically thin, p-n sub-junctions, therefore increasing the open-circuit voltage as well as reducing the delivered current and associated resistive losses. The concept is validated experimentally by the measured current-voltage characteristic of a 3xGaAs solar cell at one sun. Moreover, the experimental data allowed calibrating our theoretical model, based on the finite element method, developed for analyzing impact of proposed strategy at high concentrations. Simulation results, using Silvaco Atlas software, show that 3xGaAs cell can produce a maximum efficiency up to 33% at 3500 suns, under AM1.5D solar spectrum at 300 K.

4.2.2 Introduction

Concentrator photovoltaics (CPV) still has the potential to be one of the leading technologies for reducing the cost of energy produced by III-V solar cells [13], [127], primarily by focusing a large part of the sunlight spectrum on a small area of cell surfaces using a tracking system. Recently, the remarkable advances on the performance of CPV multijunction solar cells led to fabrication of cells with outstanding efficiencies. For example, Barrutia *et al.* reported efficiency of $\sim 40\%$ with three-junction (3J) cells [128] and Geisz *et al.* recorded efficiencies of 47.1% under high irradiation with 6J metamorphic cell [2]. In particular, recent achievement in concentrator GaAs

solar cells has a record of $29.3 \pm 0.7\%$ under 49.5 suns (49.5X) [82].

Despite these developments, the resistive losses, induced by the Joule effect in the electrical resistances ($J^2 R_S$), substantially restrict the efficiency and the cost reduction in CPV systems [17]. To alleviate this issue, some early studies focused on decreasing the series resistance R_S [18]. Considering that the $J_{sc}^2 R_S$ loss scales with the square of the current, the short-circuit current (J_{SC}) becomes a dominant factor, limiting the cell efficiency at UHCs. Therefore, minimizing the photocurrent, while increasing open-circuit voltage (V_{OC}), would remarkably enhance the cell efficiency at high concentrations. In this prospect, an alternative approach, referred to as *duplicated junction solar cells (DJSCs)*, [77] modifies the cell architecture in an attempt to overcome the resistive losses in conventional solar cells. The solution is based on splitting each subcell into several sub-junctions of similar band gap [129], [130], while the active region thickness is selected by design to provide current-matching condition. Since all the sub-junctions are vertically-stacked, the full device operates efficiently at low J_{SC} for a given R_S and concentration, as we have recently demonstrated in Ref [131].

In this work, we studied experimental and theoretical performance of a GaAs solar cell with 3 times duplication; that is, a 3xGaAs DJSC. We simulated the measured current-voltage ($J(V)$) characteristics of 3xGaAs DJSC using Silvaco Atlas software, in order to investigate the effect of the front-contact resistance on its behavior. In order to demonstrate the potential of DJSC design to operate efficiently under ultra-high concentrations, the structure has been simulated and the main figures of merit, including V_{OC} , fill factor (FF) and efficiency, have been determined as a function of concentrations.

4.2.3 Design and J-V characterization of 3xGaAs DJSC

The 3xGaAs DJSC (1 cm x 1 cm) was grown using metalorganic chemical-vapor deposition (MOCVD), on a p+-GaAs substrate. The details of the fabricated structure are shown in **Figure 4-1 (a)**. To interconnect different GaAs stacks, $Al_{0.75}Ga_{0.25}As$ ($E_g \sim 2.07$ eV) alloy was used as a highly doped tunnel junction (TJ), because of its optical transparency and reliability [96]. Each GaAs sub-junction was sandwiched between a window layer and a back-surface field (BSF) layer that act as potential barriers for minority carriers to reduce the surface and interface recombination processes [132]. In this design, it is considered that the topmost GaAs sub-junctions should be thin

and must not exceed few hundreds of nanometers, thus the layer becomes partially transparent to the solar spectrum. Hence, the thickness of each p-n junction was carefully estimated to achieve current-matching between subcells, when equally dividing the available photons. Using a MATLAB based algorithm, which allows integrating Beer Lambert law over the solar spectrum, for each p-n junction, the thickness corresponding to current-matching condition was estimated. These numbers for the top, middle and bottom sub-junctions are, respectively, 50 nm, 350 nm and 3500 nm. The produced J_{SC} at one sun, corresponding to this structure, is 8.6 mA/cm^2 , which represents the J_{SC} achieved by the limited (the top) sub-junction. Finally, antireflection coating (ARC) bilayer of $\text{TiO}_2/\text{AlO}_2$ was used in order to reduce the front-side reflectance.

Figure 4-1 (b) shows the current–voltage curve for the 3xGaAs device under simulated solar illumination. The J_{SC} , V_{OC} and FF are 7.44 mA/cm^2 , 2.75 V , 72.63% respectively.

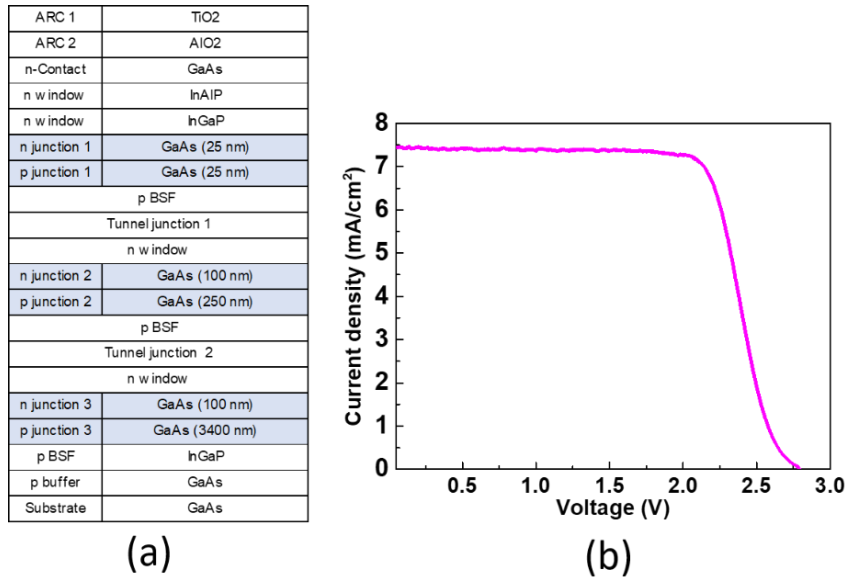


Figure 4-1 : (a) Schematic of 3xGaAs DJSC showing materials and thickness of absorption regions (not drawn to scale). (b) Current-voltage curve of 3xGaAs DJSC under one sun illumination.

The S-shape observed near the open-circuit condition is not a feature of the duplicated junction but rather an indication of a high series resistance and/or a rectifying interface. It is potentially attributed to the Schottky barrier formed at the front metal/n-GaAs interface, as suggested by Ghannam *et al.* [133] Most importantly, the 3xGaAs cell has a V_{OC} of, approximately, three times higher than that of a single-junction GaAs cell ($\sim 0.96 \text{ V}$ [134]), which implies that each sub-

junction within the device produces almost the same V_{OC} as the single-junction solar cell. Even with the slight loss in the total V_{OC} , due to the high series resistance, such a design can be used in high concentrator systems, since the produced J_{SC} is more than three times lower than the J_{SC} produced in a single-junction cell ($\sim 26.81 \text{ mA/cm}^2$ [134]).

4.2.4 Simulation of 3xGaAs device

4.2.4.1 Simulation details

To model the 3xGaAs DJSC design, we used 2D TCAD device simulations, performed with Atlas from Silvaco, a commercial semiconductor device simulator, which solves the Maxwell's and carrier transport equations self-consistently to obtain electrical and optical performances [135]. For the illumination of structures, a standard direct solar spectrum of AM1.5D ($\sim 1000 \text{ W/m}^2$ at 1 sun) was used. In order to consider multiple reflections at the interfaces of different layers, transfer-matrix method was used for calculating photogeneration. Furthermore, the radiative, Auger and Shockley-Read-Hall (SRH) recombination processes, which showed to have an important impact on the carrier's collection efficiency [17], were included in the simulations. We employed standard values for carrier mobility in GaAs, $\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}$, $\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.47}\text{P}$ and $\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ [17]. Finally, the radiative recombination rate of the order of $\sim 1\text{-}2 \times 10^{10} \text{ cm}^3/\text{s}$, SRH lifetimes of the order of $\sim 1\text{-}10 \text{ ns}$ and Auger recombination rate of $\sim 1 \times 10^{-30} \text{ cm}^6/\text{s}$, consistent with literature [136], were used in the modeling.

4.2.4.2 $J(V)$ curve of 3xGaAs solar cell

We started with reproducing the measured $J(V)$ curve of the 3xGaAs cell, shown in **Figure 4-1(b)** (b), in order to elucidate the origin of the S-shape near the open-circuit voltage condition. As can be seen in **Figure 4-2(a)**, the simulated $J(V)$ curve fitted very well the experimental data, when a contact resistance formed at the front metal/n-GaAs interface was in the order of $1 \times 10^{-2} \Omega\cdot\text{cm}^{-2}$. Consistent with findings of Ghannam *et al.* [133], such a high contact resistance can be attributed to the formation of Schottky barrier. This is supported by simulation of band diagrams at equilibrium, displayed in **Figure 4-2(b)**. Other rectifying interfaces somewhere else in the structure would have a similar effect, but the above modeling exemplifies the observed behavior and help quantify the effect to benchmark the modeling. As it can be seen, resistivity of $1 \times 10^{-2} \Omega\cdot\text{cm}^{-2}$ resulted in formation of Schottky barrier at the interface of front metal and n-GaAs that

contributes to generation of dark-current. Thus, the decrease in the V_{OC} is related to the high dark-current produced in the cell due to the barrier-related series resistance [137]. To prepare the benchmark of our future study on the optimization of 3xGaAs cells for efficient operation at ultra-high concentration, a realistic contact resistance of $5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ and a well-optimized ARC layer of SiO_2/SiN were also considered. The $J(V)$ curve and the corresponding band diagram are illustrated in **Figure 4-2**. It must be noted that this resistance value is in the upper limit of the values obtained by Huo *et al.* [18] for their fabricated contacts. The results, in **Figure 4-2**, show that by reducing the specific contact resistance to $5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ and using SiO_2/SiN ARC layers, the V_{OC} and J_{SC} could be increased, respectively, about 14.5% and 15%. Moreover, as confirmed by the energy band diagram, such a resistivity is the indication of an ohmic contact formation at the interface of front metal/n-GaAs.

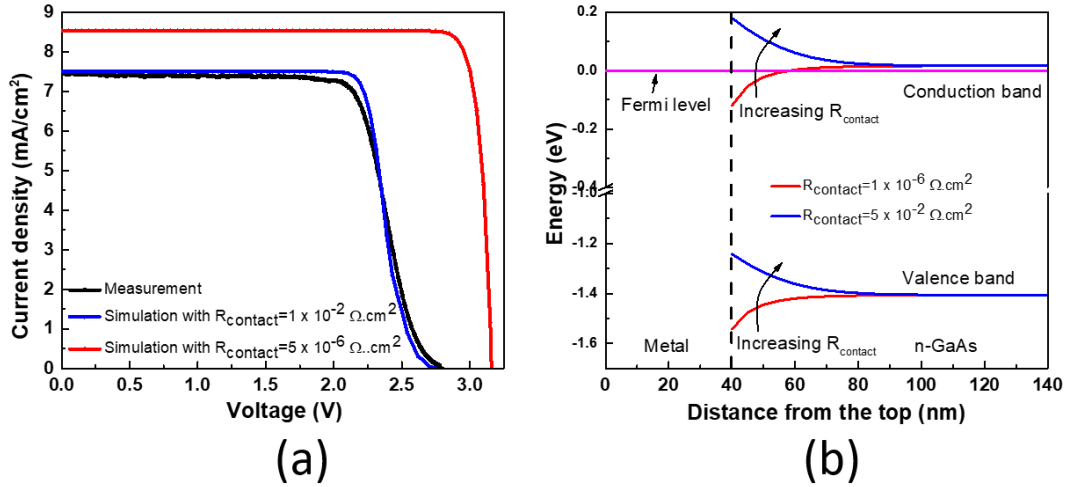


Figure 4-2 : (a) Experimental and simulation data for the $J(V)$ characteristic of 3xGaAs solar cells. (b) simulated energy band diagram of the metal and n-GaAs regions, at equilibrium, for two different values of front-contact resistance.

1.1.1.1 Performance over concentrations

Figure 4-3 shows the dependence of figures of merit on the concentration factor for a single-junction GaAs solar cell as well as a 3xGaAs DJSC. We adopted here a well optimized single-junction GaAs solar cell for comparison purpose. For the 3xGaAs DJSC, calculations were carried out in the range 1-15000X. As can be seen in **Figure 4-3** (a), the V_{OC} increases logarithmically with increased concentration, consistent with theoretical expectations [13]. Furthermore, the absolute values of the V_{OC} are also proportional to the number of p-n junctions stacked in the cell;

namely, V_{OC} of the 3xGaAs DJSC is always ~ 3 times higher than that of the single-junction GaAs solar cell. Although the empirical values of the Auger coefficients were taken into account for these calculations, in the studied concentration range, no significant impacts of these nonradiative recombination processes have been found [138]. As for the FF, it also grows in a logarithmic fashion with the concentration factor (see **Figure 4-3 (b)**). Maximum FF value of 90.9% was found for the 3xGaAs DJSC under ~ 600 suns. We note that the FF for DJSC remains at high levels even at ultra-high concentrations, compared to the single-junction GaAs cell. This demonstrates that the FF is positively affected by the increase of V_{OC} , over a wide range of concentrations, and the subsequent reduction of FF at extremely high concentrations is related to the conditions wherein the J^2R_s losses become the limiting factor.

As shown in **Figure 4-3 (c)**, the efficiency is also enhanced due to the logarithmic increase of V_{OC} as a function of concentration factor. Theoretically, the efficiency η obeys the following well-known equation [13]:

$$\eta = \frac{V_{OC} \cdot J_{SC} \cdot FF}{P_{in}} \quad (4.1)$$

where P_{in} is the incident power per unit of exposed area. Accordingly, a maximum efficiency of 33% has been achieved by the 3xGaAs DJSC under $\sim 3500X$ condition. The results are promising considering that the record efficiency of the single-junction GaAs does not exceed 29.3% at 49.5X [82] (or 29.5% at 100 suns for our simulated 1xGaAs). Given that, in Equation (4.1), both P_{in} and J_{SC} scale linearly with X and there is no decrease of V_{OC} within the investigated concentration range, decrease of efficiency after $\sim 3500X$ is mainly due to the reduction of FF, which is associated with the augmented J^2R_s losses. In fact, at a given concentration factor and R_s , the J^2R_s losses in 3xGaAs DJSC decrease by $\sim (1/3)^2$ that increases the generated power, especially, at extremely high concentrations.

The total R_s values have been extracted using the method previously explained by Fernández *et al.* [139] and values of $\sim 2.5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ and $\sim 7 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$ have been found, respectively, for simulated single-junction GaAs solar cell and the 3xGaAs DJSC. The high value of series resistance for the 3xGaAs is related to the additional layers of BSF, window and tunnel junction. Thus, the efficiency gains in such duplicated designs is because of the lower operating current. Therefore, it is certain that the efficiency peak could be further extended to the higher

concentrations if number the of sub-junctions in the same solar cell were increased. It is worth noting that such design requires the implementation of TJs that are capable of supporting the high current density produced at high concentrations. In our case, we estimated, by modeling, that the $\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.35}\text{As}/\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$ TJ has a maximum tunneling current density of $\geq 135 \text{ A/cm}^2$, which is higher than the current produced in a 3xGaAs cell, for concentrations up to 15000 Suns (i.e. $J_{\text{sc}}(15000\text{X}) \approx 128 \text{ A/cm}^2$), provided that the doping levels are higher than $\sim 1.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ in both TJ sides.

Although the Shockley-Queisser (SQ) limit [25] suggests use of ultra-high concentrations to obtain higher efficiencies [140], the highest efficiencies reported for GaAs concentrator cells are obtained at relatively low concentrations. This is due to the presence of several extrinsic losses such as series resistance, shading and parasitic recombination, which entails development of a comprehensive optimization framework [41]. DJSC is a promising strategy that would allow to overcome the SQ efficiency limit when the solar cell could effectively function at very high concentrations. In fact, each sub-junction may contribute to the overall operating voltage by sharing the solar spectrum on several sub-junctions. The contact resistance requires additional discussions since it can be further modified to improve the performance of DJSC, as shown in **Figure 4-3**. To improve the specific contact resistance at the front metal/n-GaAs interface, several methods have been investigated and reported in the literature. For example, optimizing the metallization alloy was suggested and implemented by Huo and Stolle [18]. They achieved a minimum contact resistance of $3.4 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ using Pd/Ge/Ti/Pd/Al stack on an n-GaAs layer. Another method consists of contact annealing with an optimized temperature that can transform the Schottky contact to an ohmic contact, as demonstrated by Bett *et al.* [141]. In a different attempt, Huo *et al.* showed that doping of n-GaAs contact layer affects the contact resistance [60]. They reported a contact resistance value of $8.7 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ for a doping level of $1.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Based on these studies, which are only the highlights of explored methods presented in the literature, we can argue that the efficiency peak of 3xGaAs DJSC could be feasibly extended towards higher concentrations than what demonstrated here, by fabricating cells with low specific contact resistance. Our findings demonstrated the validity and the impact of such an approach for considerably improving the figures of merit for III-V solar cells. The presented outcomes are of high importance to the future of CPV systems, especially for green energy production in regions with medium and low direct-normal irradiation.

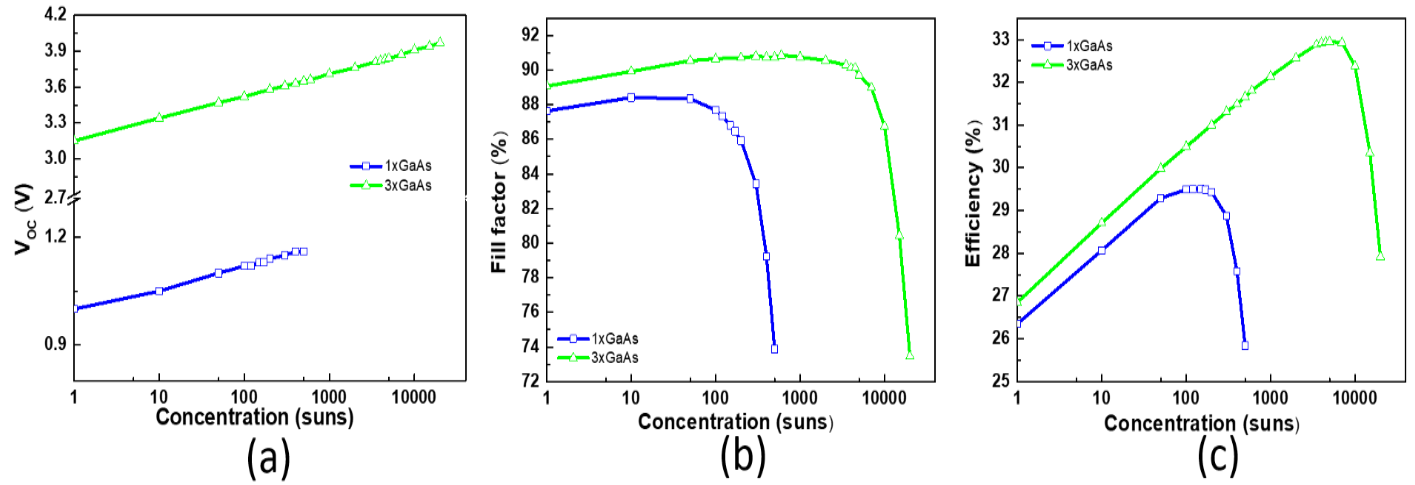


Figure 4-3 : Evolution of, as a function of concentrations, (a) V_{OC} , (b) FF and (c) efficiency for single-junction and 3x-DJSC GaAs solar cells.

4.2.5 Conclusions and future works

We have investigated performance of a 3xGaAs DJSC and demonstrated that such a design can operate with a viable efficiency at ultra-high concentrations (up to 3500 suns), through reducing resistive losses. A 3xGaAs DJSC was fabricated and characterized to validate the concept. Moreover, the experimental data were employed for calibration of device modelling, based on finite element method. With 3xGaAs DJSC structure, the absolute efficiency can be enhanced up to ~ 3.5% compared to a standard cell. The DJSC concept enables design re-optimization by thinning the sub-junctions, hence it provides a two-fold benefit. First, thinner sub-junctions make it possible to incorporate materials that have a low diffusion length. Second, using a stack of ultra-thin sub-junctions confines the photons inside the cell, hence photon-recycling in the same sub-junction or luminescent coupling between sub-junctions can enhance the device performance. Further simulations are in progress aiming at (i) applying such concept to highly multi-stacked structures with more than one material and (ii) optimizing the TJ structures, which could be applied in such designs at high concentrations. Our results demonstrate that such an innovative approach enables high-efficiency energy harvesting at ultra-high concentrations.

4.2.6 Acknowledgments

The authors would like to thank the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC); and the Fonds de Recherche du Québec- Nature et Technologies (FRQNT) and the financial consultant Prompt for financial support. The authors would like to thank also Saint-Augustin Canada Electric Inc (STACE), Quebec Centre for Advanced Materials (QCAM) and CMC microsystems for their assistance. Technical support of 3IT members and staffs is greatly appreciated.

Chapitre 5. SIMULATION DES CELLULES SOLAIRES MJ DUPLIQUEES SOUS CONCENTRATION SOLAIRE PAR SILVACO ATLAS

Les cellules dupliquées sont désignées pour l'opération sous hautes concentrations (≥ 1000 soleils). Afin d'assurer un bon fonctionnement à ces concentrations, les jonctions tunnel (JTs) sont des composantes critiques qui nécessitent d'être optimisées.

Dans ce chapitre, nous commençons par une présentation de logiciel Atlas de la compagnie Silvaco-TCAD ainsi que les modèles physiques utilisés. Ensuite, trois différentes structures de JTs sont simulées. Une fois que le dopage optimal est sectionné, nous intégrons ces JTs dans les cellules dupliquées pour étudier leurs performances à hautes concentrations. Nous étudions finalement les cellules dupliquées suivantes : 2xGaAs et 2xInGaP/2xGaAs.

5.1 Simulation numérique par Silvaco

Bien que l'expérimentation reste la méthode la plus fiable pour optimiser et évaluer les performances des cellules solaires, elle reste coûteuse et prend du temps. Cependant, la modélisation se voit comme un moyen rapide et relativement moins coûteux pour concevoir des cellules solaires. Les modélisations et les simulations peuvent étudier des milliers de combinaisons des paramètres avant la fabrication des dispositifs réels. Pour cela, il est important que les modèles physiques utilisés soient les plus réalistes possible pour reproduire les comportements réels des cellules solaires.

L'outil de simulation utilisé dans cette thèse est le logiciel Atlas appartenant aux familles des logiciels de la société Silvaco-TCAD (Silicon Valley Corporation - Technology Computer Aided Design). Cet outil modélise non seulement les comportements électriques, optiques et thermiques, mais aussi les processus de fabrication (gravure, dépôt, dopage, diffusion, épitaxie, etc.) des composants à base de semiconducteurs, notamment les cellules solaires. Atlas fournit aussi des informations sur la distribution interne des variables associées au fonctionnement du dispositif telles que, le champ électrique, le potentiel, les concentrations des porteurs de charges, etc., autant

de données extrêmement importantes pour une meilleure conception et optimisation des procédés technologiques.

Silvaco-TCAD possède plusieurs outils permettant de réaliser toutes ces tâches. Ces outils sont présentés dans la **Figure 5-1** et divisés en deux catégories : deux outils de cœur et trois outils interactifs.

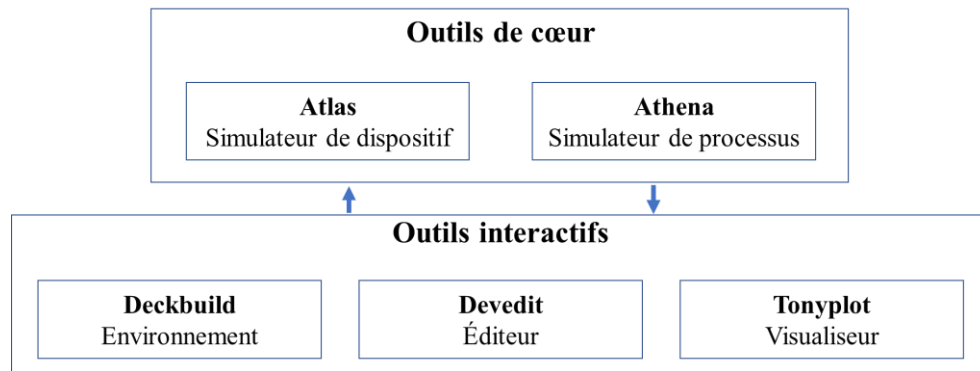


Figure 5-1 : Outils de cœur et interactifs de Silvaco-TCAD [142].

Les simulateurs Atlas et Athena réalisent, respectivement, les simulations des dispositifs et des processus. Les outils interactifs permettent de communiquer avec les simulateurs et de visualiser les résultats obtenus. *Deckbuild* est un environnement où les commandes à exécuter sont décrites. Il permet ainsi de visualiser l'exécution du code en temps réel. *Devedit* est un éditeur graphique qui permet de construire ou modifier l'architecture d'un dispositif. Enfin, *Tonyplot* permet de visualiser en 2D ou 3D les dispositifs réalisés ainsi que leurs comportements électriques, optiques et thermiques. Il trace aussi les différentes courbes des résultats, comme la courbe J(V).

Dans ce travail de thèse, les simulations sont réalisées par le simulateur Atlas pour déterminer les comportements électriques et optiques des cellules solaires.

5.1.1 Simulateur Atlas

Atlas mène des analyses DC et AC pour les dispositifs à base de différents matériaux (semi-conducteurs, métaux, oxydes, etc.). La construction d'un code avec Atlas se fait en plusieurs étapes principales, comme présenté à **Figure 5-2** :

- Définition du design : à cette étape, on définit le maillage, les différentes couches, dopages, épaisseurs, compositions, etc. La structure peut se construire par le code *Deckbuild* ou directement importée à partir de l'un des deux outils *Devedit* ou *Tonyplot*.

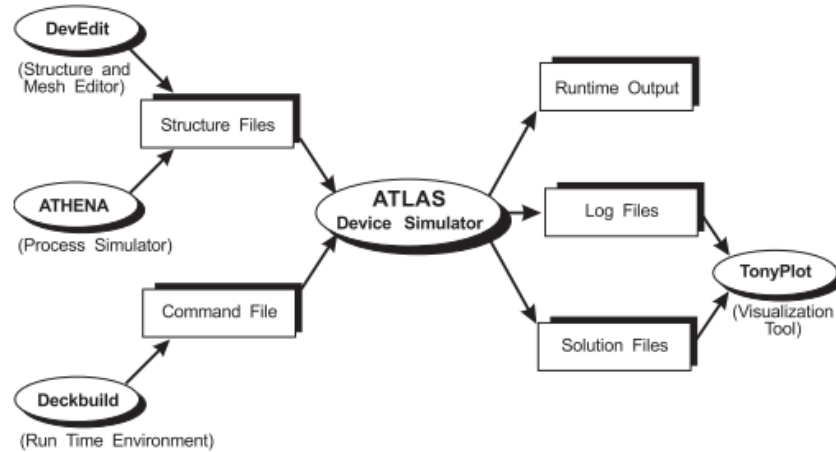


Figure 5-2 : Paramètres d'entrée et de sortie d'Atlas [142].

- Définition des matériaux à utiliser : cela permet de définir les paramètres des matériaux et les interfaces. Plus précisément, on définit la durée de vie des porteurs, les gaps, les indices de réfraction, les coefficients de recombinaison (radiative, SRH et Auger), etc.
- Définition des modèles physiques : à cette étape, les modèles physiques appropriés sont définis. Par exemple, les trois types des recombinaisons, ionisation, les mobilités des porteurs, le mécanisme d'effet tunnel, etc.
- Définition de la méthode du calcul numérique : cela consiste à déterminer la méthode numérique à utiliser pour résoudre les équations aux dérivées partielles ; comme les méthodes Newton, Fermi, etc. Dans cette étape, nous spécifions aussi l'erreur tolérée et le nombre maximal d'itérations à ne pas dépasser.
- Définition des entrées électriques et optiques : à cette étape, on spécifie les conditions sous lesquelles il faut résoudre les équations de transport. Par exemple, dans le cas de l'étude d'une cellule solaire dans l'obscurité, nous spécifions les tensions appliquées aux contacts pour avoir la courbe $J(V)$. Dans le cas d'une cellule sous illumination, on définit aussi le spectre solaire ainsi que l'endroit où la cellule devrait être exposée à la lumière.
- Définition des sorties : cette étape consiste à déterminer les paramètres à visualiser par la suite par *Tonyplot*.

Après la définition de la structure et les paramètres physiques, Atlas trouve la solution numérique des équations fondamentales qui relient les concentrations des porteurs de charges au potentiel électrostatique, à chaque point du maillage de la structure. Ci-dessous, l'équation de Boltzmann qui est la base de modèle dérive-diffusion est décrite, suivie des modèles physiques.

5.1.2 Équation de Boltzmann

Les modèles de transport de charges (électrons et trous) dans les semi-conducteurs sont généralement basés sur la résolution de l'équation de Boltzmann. Cette dernière décrit l'évolution de la fonction de distribution $f(r, k, t)$ des porteurs de charges qui dépend de la position r , vecteur d'onde k et du temps t . Cette équation s'écrit [143]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \nabla_r f + \frac{qE}{\hbar} \nabla_k f = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{collisions} \quad (5.1)$$

où E est le champ électrique. \hbar est la constante de Planck réduite et v est la vitesse des porteurs.

Le premier terme traduit la variation de la fonction de distribution dans le temps. Le deuxième terme traduit l'influence des diffusions. Le troisième terme traduit l'effet du champ électrique sur le mouvement de la particule. Le quatrième terme traduit les interactions et les collisions entre les particules ainsi que les collisions avec les impuretés et les défauts du réseau cristallin.

À l'équilibre thermodynamique à une température T et aucune force n'est appliquée, le système obéit à la statistique de Fermi-Dirac. Dans ce cas, la fonction f s'écrit :

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\varepsilon - E_F}{k_B T}\right)} \quad (5.2)$$

Cette fonction représente la probabilité qu'un état électronique d'énergie ε soit occupé par un électron. Sous Silvaco Atlas, il existe deux façons d'introduire la répartition de charges sur les niveaux d'énergie, on peut utiliser soit la fonction Fermi-Dirac directement, soit la statistique de Boltzmann qui est une forme simplifiée de la fonction de Fermi-Dirac obtenue quand la différence $\varepsilon - E_F$ est très supérieure à $k_B T$:

$$f(\varepsilon) = \exp\left(\frac{E_F - \varepsilon}{k_B T}\right) \quad (5.3)$$

Pratiquement, l'approximation classique de Boltzmann s'applique si le matériau à faible ou moyen niveau de dopage. En revanche, dans le cas où le matériau est fortement dopé, la statistique de Fermi-Dirac est recommandée.

La résolution de l'équation (5.1) a toujours été un domaine de recherche intéressant pour la physique du transport dans les semi-conducteurs. Pour ce faire, les chercheurs proposent deux

méthodes : l'approche stochastique par le modèle de Monte-Carlo et l'approche déterministe par le modèle dérive-diffusion.

5.1.3 Modèle dérive-diffusion

Dans notre cas, le simulateur Atlas utilise le modèle dérive-diffusion et la statistique de Fermi-Dirac pour décrire l'évolution des porteurs de charges dans les matériaux [144]. Ce modèle prend en considération deux aspects : la dérive due au champ électrique appliqué au dispositif et le transport de charge causé par le gradient de concentration des porteurs. Le modèle met en jeu trois différentes équations fondamentales :

5.1.3.1 Équation de Poisson

À partir des équations de Maxwell, on peut dériver les équations qui décrivent le transport de charges dans les semi-conducteurs et qui sont résolues par le simulateur Atlas. L'équation de Poisson généralisée s'écrit :

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \varphi) = \rho = q(p - n + N_D - N_A) \quad (5.4)$$

où ρ , ε et φ représentent, respectivement, la densité de charges libres, la permittivité diélectrique du matériau et le potentiel électrostatique. La densité ρ est donnée par la somme des concentrations d'électrons et de trous libres (n et p) ainsi que les concentrations d'impuretés ionisées N_A et N_D .

Le champ électrique E est obtenu à partir du potentiel électrostatique en utilisant la formule suivante : $E = -grad(\varphi)$.

5.1.3.2 Équations de discontinuité

Les équations de continuité, décrivant l'évolution temporelle des densités de charges, pour les électrons et les trous sont définies par :

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} div \vec{J}_n + G_n - R_n & (5.5) \\ \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} div \vec{J}_p + G_p - R_p & (5.6) \end{cases}$$

où \vec{J}_n et \vec{J}_p sont les densités de courant pour les électrons et les trous, respectivement. $G_{n(p)}$ est le taux de génération pour les électrons (trous) et $R_{n(p)}$ est le taux de recombinaison pour les électrons et les trous.

Dans la simulation des cellules solaires, on considère le cas statique où la variation par rapport au temps est nulle. Les équations (5.5) et (5.6) deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_n = G_n - R_n \end{array} \right. \quad (5.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_p = G_p - R_p \end{array} \right. \quad (5.8)$$

Physiquement, ces équations signifient que la variation de la densité du courant dans un volume donné est la différence entre le taux de génération et le taux de recombinaison, c'est-à-dire que le nombre des porteurs est conservé. La **Figure 5-3** explique schématiquement ces équations dans le cas du transport à une dimension (cas d'électrons).

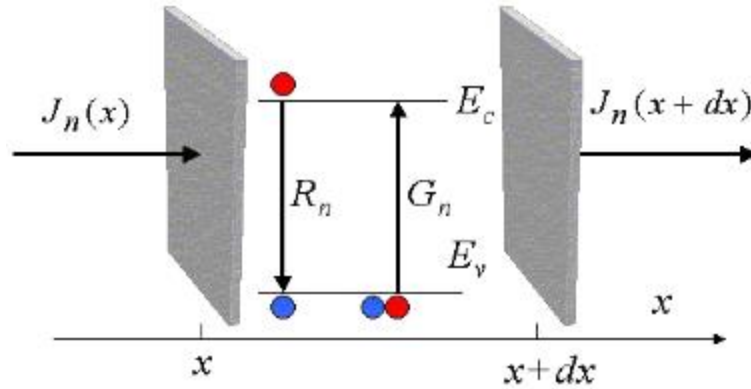


Figure 5-3 : Équations de continuité permanentes dans une cellule solaire.

5.1.3.3 Équations de transport

Le mouvement d'un porteur de charge se fait soit sous l'action d'un champ électrique E , soit sous l'action d'un gradient de concentration de porteurs. Si un champ E est appliqué, on parle donc de cas d'un courant de *dérive* (ou de *conduction*). Ce courant est proportionnel au champ électrique, tel que donné par la formule suivante :

$$\vec{J}_n = nq\mu_n \vec{E} \quad (5.9)$$

$$\vec{J}_p = -pq\mu_p \vec{E} \quad (5.10)$$

où μ_n et μ_p sont les mobilités des électrons et des trous, respectivement.

Sous l'action d'une variation spatiale de concentration de porteurs de charges, ces dernières se déplacent des régions à forte concentration vers les régions à faible concentration. Un courant appelé courant de *diffusion* s'établit :

$$\begin{cases} \vec{J}_n = qD_n \nabla n \\ \vec{J}_p = qD_p \nabla p \end{cases} \quad (5.11)$$

$$(5.12)$$

où D_n et D_p sont les coefficients de diffusion des électrons et des trous. Ces coefficients sont déterminés par l'équation d'Einstein :

$$\begin{cases} D_n = \frac{k_B T}{q} \mu_n \\ D_p = \frac{k_B T}{q} \mu_p \end{cases} \quad (5.13)$$

$$(5.14)$$

Le courant total des électrons et des trous est obtenu par la somme de ces deux types de courants (dérive et diffusion). Nous aboutissons aux expressions suivantes :

$$\begin{cases} \vec{J}_n = nq\mu_n \vec{E} + qD_n \nabla n \\ \vec{J}_p = pq\mu_p \vec{E} - qD_p \nabla p \end{cases} \quad (5.15)$$

$$(5.16)$$

En résolvant numériquement les différentes équations, Atlas trouve la solution convergente qui relie n , p et φ pour toute la structure. Deux critères sont définis préalablement pour déterminer cette convergence : i) l'erreur entre les deux membres de l'équation ; ii) l'erreur entre deux itérations successives.

5.1.4 Modèles physiques

Pour chaque grandeur physique, Atlas possède plusieurs modèles pour modéliser les phénomènes physiques. Dans cette partie, nous nous focalisons seulement sur certains modèles qui ont été utilisés dans nos simulations. Le modèle d'effet tunnel utilisé est décrit dans le chapitre 2.

5.1.4.1 Mobilité

Les électrons et les trous sont accélérés par le champ électrique, mais perdent de leur vitesse à la suite de divers processus de diffusion. Ces mécanismes de diffusion incluent les vibrations du réseau (phonons), impuretés, états de surface, etc. Nous avons choisi un modèle physique de

Caughey et Thomas [145]; qui prend en considération la variation de la mobilité avec la température et la concentration des dopants :

$$\mu_{n,p} = \mu_{1\,n,p} \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{\alpha_{n,p}} + \frac{\mu_{2\,n,p} \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{\beta_{n,p}} - \mu_{1\,n,p} \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{\alpha_{n,p}}}{1 + \left(\frac{T}{300}\right)^{\gamma_{n,p}} \cdot \left(\frac{N_{total}}{N_{n,p,ref}}\right)^{\delta_{n,p}}} \quad (5.17)$$

où μ_1 , μ_2 , α , β , γ , δ et $N_{n,p,ref}$ sont des paramètres empiriques d'ajustement. N_{total} est la concentration nette du dopage. Dans notre cas, nous supposons que la température est fixe à 300 K, l'expression de mobilité devient :

$$\mu_{n,p} = \mu_{1\,n,p} + \frac{\mu_{2\,n,p} - \mu_{1\,n,p}}{1 + \left(\frac{N_{total}}{N_{n,p,ref}}\right)^{\delta_{n,p}}} \quad (5.18)$$

Dans nos simulations, nous avons considéré les paramètres résumés dans le **Tableau 5-1**.

Tableau 5-1 : Paramètres de modélisation pour le calcul des mobilités pour différents matériaux [17], [146].

	μ_1 (cm ² /V.s)		μ_2 (cm ² /V.s)		$N_{n,p,ref}$ (cm ⁻³)		$\delta_{n,p}$	
	électron	trou	électron	trou	électron	trou	électron	trou
GaAs	500	20	9400	491.5	3.89x10 ¹⁶	1.48x10 ¹⁷	0.39	0.38
AlGaAs	500	5	2000	240	1x10 ¹⁶	1x10 ¹⁷	0.32	0.32
InGaP	400	15	4300	150	2x10 ¹⁶	1.5x10 ¹⁷	0.7	0.8

5.1.4.2 Recombinaisons et temps de vie

Les processus de recombinaison considérées dans la simulation sont les processus radiative et non radiative (SRH et Auger) [142], [144]. Dans le cas radiatif, le taux de recombinaison R_{rad} dépend de la constante radiative C_{rad} :

$$R_{rad} = C_{rad}(np - n_i^2) \quad (5.19)$$

où n_i est la concentration intrinsèque de porteurs de charges. La durée de vie des porteurs s'écrit en fonction de C_{rad} , N_A et N_D :

$$\tau_{rad,e(h)} = \frac{1}{C_{rad}N_{A(D)}} \quad (5.20)$$

Les recombinaisons SRH sont soit volumique ou surfacique. Dans le volume, le taux de recombinaison $R_{SRH,volume}$ s'écrit :

$$R_{SRH,volume} = \frac{np(1 - \exp\left(\frac{E_{F,h} - E_{F,e}}{k_B T}\right))}{n\tau_{h,SRH} \left(1 + \frac{n_i e^{-(E_{F,e} - E_C - E_{trap})}}{N_C}\right) + p\tau_{e,SRH} \left(1 + \frac{n_i e^{-(E_V - E_{F,h} + E_{trap})}}{N_V}\right)} \quad (5.21)$$

où E_C , E_V et E_{trap} sont les énergies de BC, BV et des impuretés. N_C et N_V sont les densités dans la BC et BV, respectivement. $\tau_{e,SRH}$ et $\tau_{h,SRH}$ sont les durées de vie des électrons et des trous, respectivement. Ces deux paramètres dépendent de la concentration des impuretés dans le matériau selon :

$$\tau_{e(h),SRH} = \frac{\tau_{0,e(h)}}{1 + \left(\frac{N_{A(D)}}{N_{0,A(D)}}\right)^{\gamma_{e(h)}}} \quad (5.22)$$

Les durées de vie $\tau_{0,e(h)}$ correspondent au cas d'un matériau sans impuretés. $N_{0,A(D)}$ représentent la densité de densité de dopants de référence. γ est un composant empirique qui calibre la dépendance au dopage.

Dans la surface :

$$R_{SRH,surface} = \frac{np(1 - \exp\left(\frac{E_{F,h} - E_{F,e}}{k_B T}\right))}{n \left(1 + \frac{n_i e^{-(E_{F,e} - E_C - E_{trap})}}{N_C}\right) / s_{h,SRH} + p \left(1 + \frac{n_i e^{-(E_V - E_{F,h} + E_{trap})}}{N_V}\right) / s_{e,SRH}} \quad (5.23)$$

où $s_{e,SRH}$ et $s_{h,SRH}$ sont les vitesses de recombinaisons surfaciques pour électrons et trous, respectivement.

Concernant la recombinaison Auger, nous avons utilisé le modèle standard suivant :

$$R_{Auger} = A_n(pn^2 - nn_i^2) + A_p(np^2 - pn_i^2) \quad (5.24)$$

où A_n et A_p sont les coefficients Auger pour les électrons et les trous, respectivement. Ces paramètres sont définis dans Atlas pour chaque matériau semi-conducteur. Dans ce cas, la durée de vie correspondante s'écrit :

$$\tau_{Auger,e(h)} = \frac{1}{A_{n(p)} N_{A(D)}^2} \quad (5.25)$$

La durée de vie totale des électrons et des trous minoritaires est donnée par [147]:

$$\frac{1}{\tau_{e(h)}} \approx \frac{1 - \emptyset}{\tau_{rad,e(h)}} + \frac{1}{\tau_{e(h),SRH}} + \frac{1}{\tau_{Auger,e(h)}}$$

où le facteur $\emptyset \leq 1$ est introduit pour prendre en compte le phénomène de recycle de photons.

5.1.4.3 Comportement optique

Les chemins optiques dans les dispositifs sont déterminés par les indices de réfraction réel (n) et imaginaire (ou coefficient d'extinction k). Ce dernier dépend du coefficient d'absorption α du matériau selon :

$$\alpha \text{ (cm}^{-1}\text{)} = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (5.26)$$

Dans Atlas, nous pouvons définir ces paramètres par trois méthodes différentes : i) utilisation directe des valeurs tabulées, ii) utilisation d'un langage C pour définir les modèles; ou iii) utilisation des modèles prédéfinis dans le logiciel. Dans nos simulations, nous avons utilisé des valeurs tabulées de n et k en fonction de longueurs d'onde. Dans le cas où ces valeurs sont indisponibles pour certaines compositions, nous utilisons le modèle prédéfini d'Adachi [142] pour calculer l'indice réel n :

$$n^2 = A. \left(\frac{E_{ph}}{E_g}\right)^{-2} \cdot \left[2 - \sqrt{1 + \frac{E_{ph}}{E_g}} - \sqrt{1 - \frac{E_{ph}}{E_g}} \right] + B \quad (5.27)$$

où E_{ph} est l'énergie du photon incident. A et B sont des paramètres empiriques qui dépendent de la composition dans les alliages.

Concernant la propagation de la lumière dans les dispositifs, Atlas propose trois différentes méthodes : 1) Finite Difference Time Domain (FDTD), 2) Ray Tracing (RT); ou 3) matrice de transfert. Dans nos simulations, nous avons utilisé la dernière approche qui est plus adaptée pour

des structures en couches très minces. C'est une méthode rapide, n'exige pas assez de paramètres et prend en considération les interférences dans les couches. Dans ce modèle, chaque couche est modélisée par une matrice qui comprend l'indice de réfraction n , l'épaisseur de la couche h , la longueur d'onde ainsi que l'angle d'incidence θ :

$$M = \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & i \frac{1}{Y} \sin(\Psi) \\ iY \sin(\Psi) & \cos(\Psi) \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

où Ψ est le déphasage de l'onde qui propage au travers de la couche, donné par :

$$\Psi = \frac{2\pi}{\lambda} nh \cos(\theta) \quad (5.29)$$

Y est l'admittance optique de la couche, donnée par :

- Pour la polarisation transverse électrique (TE) :

$$Y^{(TE)} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{n}{\cos(\theta)} \quad (5.30)$$

- Pour la polarisation transverse magnétique (TM) :

$$Y^{(TM)} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n \cos(\theta) \quad (5.31)$$

où ϵ_0 et μ_0 sont la permittivité et la perméabilité du vide. Si on considère que l'incidence est normale sur la surface, ce qui est le cas dans la plupart des cas réels. Le déphasage de l'onde Ψ et l'admittance Y deviennent :

$$\Psi = \frac{2\pi}{\lambda} nh \quad (5.32)$$

$$Y = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n \quad (5.33)$$

Pour une structure possédant n couches, le champ électrique E et magnétique H selon la direction z se calculent, respectivement par :

$$\begin{bmatrix} E(z) \\ H(z) \end{bmatrix} = M_1 \cdot M_2 \dots M_n \begin{bmatrix} E(0) \\ H(0) \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

5.2 Conception des jonctions tunnel

Comme mentionnée à la section 2.3.2, les JT dans les cellules dupliquées doivent être à la fois transparentes, de faible résistance série et en accord de maille. Ce dernier critère limite les matériaux utilisés dans les JT à : $\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}$ ($\sim 1.89\text{eV}$), $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ ($\sim 1.92\text{eV}$) et $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ ($\sim 2.05\text{ eV}$). Ces matériaux sont en accord de maille avec les substrats de GaAs et Ge et ont des gaps suffisamment élevés pour être utilisés dans les cellules dupliquées [96].

5.2.1 Cadre théorique

Trois types d'effet tunnel ont été utilisés dans les simulations : effet tunnel inter-bandes, intra-bandes et à travers les hétérojonctions.

5.2.1.1 Tunnel inter-bandes

Ce mécanisme représente le passage d'un porteur libre d'une bande à l'autre entre deux semi-conducteurs de types différents (n et p). Ce mécanisme apparaît dans les régions dégénérées. Dans nos simulations, nous avons employé le modèle *Non-Local Bande-à-Bande (NLBAB)*. Le choix s'est porté sur ce modèle, car il est le plus adapté pour reproduire les résultats expérimentaux [66], [148]. En effet, il prend en considération la distribution non-uniforme du champ électrique dans le dispositif [149], contrairement aux modèles dits locaux où le champ électrique est considéré fixe au travers de la JT. Par conséquent, le modèle *NLBAB* quantifie la séparation spatiale des électrons photogénérés dans la bande de conduction (BC) et les trous dans la bande de valence (BV). La **Figure 5-4** montre une présentation schématique des processus local et non local.

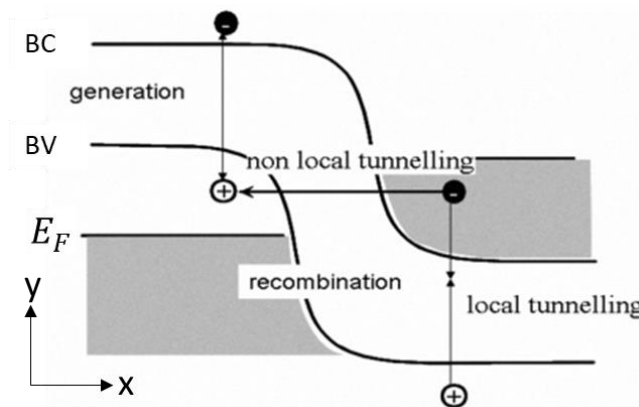


Figure 5-4 : Diagramme de bandes d'une JT expliquant l'effet tunnel local et non local.

Pour prendre en compte ces effets, nous pouvons intégrer la probabilité de transmission $T(E)$, à travers la jonction, d'un électron d'énergie longitudinale E et transversale E_T . Dans ce cas, la densité du courant tunnel est largement dominée par $T(E)$ tel que donné par l'expression [135]:

$$J = \frac{q}{\pi\hbar} \iint T(E, k_T) [f_g(E + E_T) - f_d(E + E_T)] \rho(E_T) dE. dE_T \quad (5.35)$$

$\rho(E_T)$ est la densité d'état à 2D correspondant aux deux composantes transversales k_T du vecteur d'onde, et calculée par l'expression :

$$\rho(E_T) dE_T = \frac{dk_T^2}{(2\pi)^2} \quad (5.36)$$

où f_g et f_d sont, respectivement, les distributions de Fermi-Dirac du côté gauche (du niveau E_{Fg}) et droit (du niveau E_{Fd}) de la jonction, et sont données par :

$$f_g = (1 + \exp [(E + E_T - E_{Fg})/k_B T])^{-1} \quad (5.37)$$

$$f_d = (1 + \exp [(E + E_T - E_{Fd})/k_B T])^{-1} \quad (5.38)$$

5.2.1.2 Tunnel intra-bandes

L'effet tunnel intra-bandes représente le passage d'un porteur libre à travers une barrière de potentiel entre deux couches semi-conductrices en restant toujours dans la même bande d'énergie. Pour déterminer la densité du courant dans ce cas, on considère les trois approximations suivantes pour intégrer l'équation (5.35):

- On néglige la variation de la transmission T selon la composante transversale du vecteur d'onde, ce qui permet de séparer les deux intégrales dans l'expression (5.35).
- Le transport se fait selon une seule direction (x).
- On considère la probabilité de transmission semi-classique de Kane entre deux positions x_1 et x_2 :

$$T_{Kane}(E, k_T) = \frac{\pi^2}{9} \exp \left(-2 \int_{x_1}^{x_2} \text{Im}(k_x(E, k_T)) dx \right) \quad (5.39)$$

Cette expression est calculée à partir des équations de Schrödinger en utilisant la règle d'or de Fermi [149]. En supposant $k_T = 0$, le courant J à travers la JT devient :

$$J = \frac{8\pi q m^*}{h^3} \int_0^{\Delta E} dE_x T(E_x, k_T = 0) \int_{-\infty}^{+\infty} dE_T [f_g(E_x + E_T) - f_d(E_x + E_T)] \quad (5.40)$$

On définit un nouveau terme $N(E_x)$ appelé "supply-function" donné par :

$$\begin{aligned} N(E_x) &= \int_{-\infty}^{+\infty} dE_T [f_g(E_x + E_T) - f_d(E_x + E_T)] \\ &= k_B T \ln \left[\frac{1 + \exp\left(q \frac{E_{Fg} - E_x}{k_B T}\right)}{1 + \exp\left(q \frac{E_{Fd} - E_x}{k_B T}\right)} \right] \end{aligned} \quad (5.41)$$

Cette expression est connue aussi sous le nom de modèle de *Tsu-Esaki* et est très largement utilisée dans les simulations TCAD, sous Silvaco Atlas par exemple. Ce formalisme est aussi un modèle non local élastique.

5.2.1.3 Tunnel à travers une hétérojonction

Ce mécanisme est utilisé pour simuler le transport à travers une hétérojonction abrupte en utilisant le modèle d'émission thermoïonique assistée par effet de champ. Ce modèle est basé sur les travaux de *K. Yang et al.* [150]. La **Figure 5-5** représente le cas une hétérojonction abrupte où la densité de courant nette pour les électrons est donnée par :

$$J_n = -\frac{TA^*}{k} \int_{E_{min}}^{+\infty} f_1(E_x) T(E_x) dE_x + \frac{TA^*}{k} \int_{E_{min}}^{+\infty} f_2(E_x) T(E_x) dE_x \quad (5.42)$$

où $E_{min} = \max[E_c(0^-), E_c(W)]$. $f_{1,2}$ sont les fonctions de distribution de Boltzmann pour la zone 1 et 2, et sont données par les équations (5.37) et (5.38). L'expression (5.42) est valide aussi pour trous dans la BV.

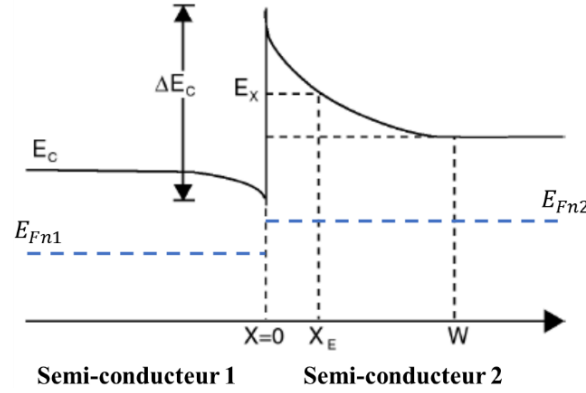


Figure 5-5 : Diagramme de bande de conduction d'une hétérojonction abrupte. W est la largeur de la barrière.

Le courant J à travers la JT dépend de la constante de Richardson effective $A_{e,h}^*$ qui varie en fonction de la masse effective des porteurs de charges $m_{e,h}^*$ selon [151]:

$$A_{e,h}^* = \frac{4\pi q k^2 m_{e,h}^*}{h^3} \quad (5.43)$$

Cette équation est valable que pour un semiconducteur ayant une bande d'énergie avec des surfaces ellipsoïdales à énergie constante dans l'espace de quantité de mouvement (k). Elle traduit la vitesse du porteur à travers la jonction tunnel et varie d'un matériau semi-conducteur à l'autre. Pour définir les trois mécanismes d'effet tunnel dans Atlas, on définit d'abord la zone dans laquelle l'effet tunnel est appliqué. Pour ce faire, Atlas propose de former une zone rectangulaire où on spécifie également le nombre de zones de tunnellation et le nombre de points de maillage le long des zones. Cette méthode n'est pas la meilleure, car elle n'est applicable qu'aux jonctions planaires parallèles aux axes x ou y (voir **Figure 5-4**).

5.2.2 Caractéristique $J(V)$ des jonctions tunnel

La caractéristique $J(V)$ se comprend facilement en analysant l'évolution des diagrammes de bande lorsqu'un potentiel V est appliqué aux bornes du composant. La **Figure 5-6** illustre le cas d'une JT de $p\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/n\text{-In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}$ dopée $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} / 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ et d'épaisseur $25 \text{ nm} / 25 \text{ nm}$. Les niveaux de Fermi sont notés E_{Fn} et E_{Fp} .

- (a) Dans ce cas, aucun potentiel n'est appliqué ($V=0$), la jonction est en équilibre électrostatique et les niveaux de Fermi sont alignés. La probabilité d'effet tunnel est très

faible et autant d'électrons vont traverser la bande interdite de la BV vers la BC que d'électrons de la BC vers la BV. Donc le courant total est nul.

- (b) La tension appliquée est négative, la barrière de potentiel devient plus fine et le champ électrique devient très élevé. Dans ce cas, la probabilité d'effet tunnel augmente et une densité de courant négative traverse la JT à partir des états occupés de la région p vers les états libres de la région n.
- (c) Quand la tension augmente ($V > 0$), la barrière de potentiel devient de plus en plus faible et les électrons d'états occupés dans la région n peuvent traverser la jonction vers les états libres de la région p, générant ainsi une densité de courant positive. Dans la région 1 de faible tension, le transport est très fort et caractérisé par une faible résistance. La densité du courant atteint un maximum pour un pic de tension V_P , appelée pic du courant J_P (mentionnée à la section 2.3.2).
- (d) Quand la tension augmente encore dans la région 2, la barrière de potentiel devient de plus en plus élevée et la résistance différentielle devient négative, ce qui engendre une diminution du courant. Pour les hautes tensions (région 2), la probabilité d'effet tunnel devient très faible et le courant diminue jusqu'à devenir nulle pour $V = V_{vallée}$. Cette région est connue sous le nom de vallée de la jonction. En réalité, le courant n'est pas tout à fait nul dans cette région à cause des états localisés dans la bande interdite qui peuvent traverser par effet tunnel inélastique assisté par la présence des défauts.
- (e) Pour des tensions très importantes ($V > V_{vallée}$), la jonction TJ se comporte comme jonction p-n classique où les électrons traversent la barrière de potentiel par diffusion (région 3).

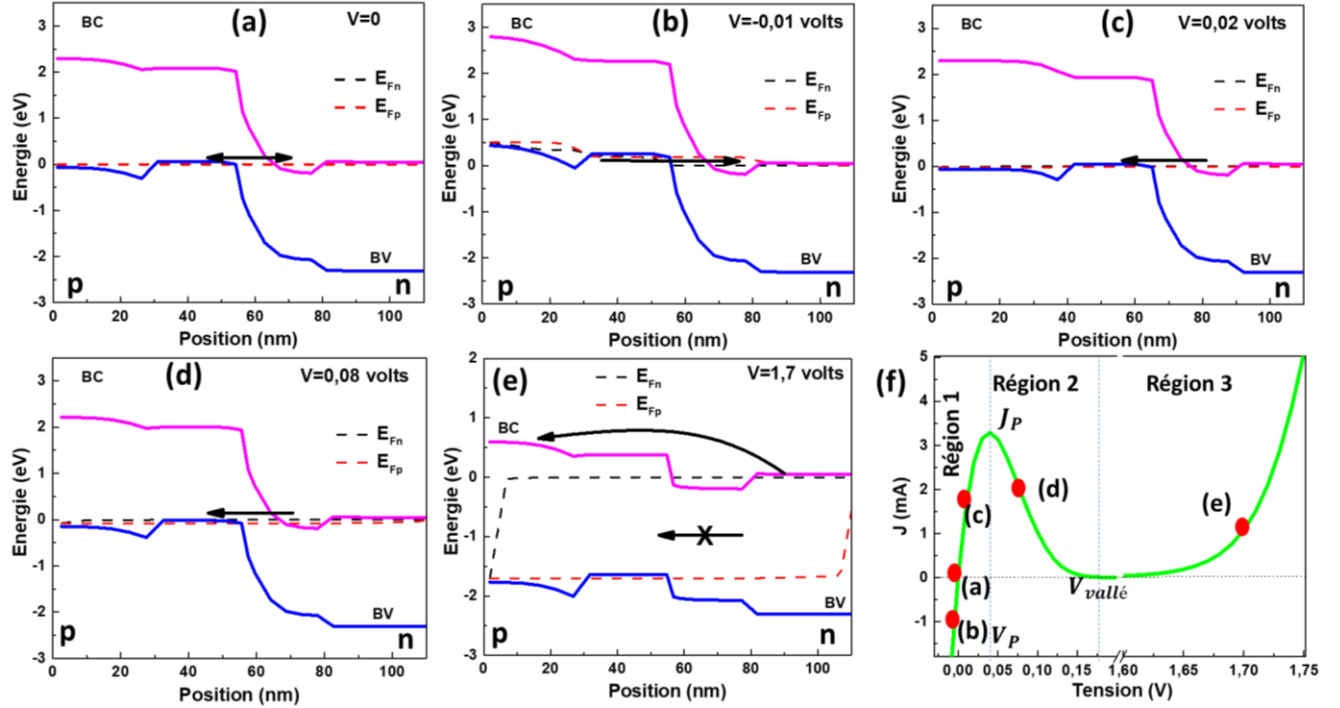


Figure 5-6 : (a) à (e) évolution du comportement de diagramme de bande de la JT; (f) la caractéristique J(V). Les simulations sont effectuées par Atlas.

5.2.3 Description des jonctions tunnel

Les JTs doivent être capables de transmettre le courant photo-généré d'une densité supérieure à une dizaine d'ampères par cm^2 avec la plus faible résistivité possible. Ceci est théoriquement possible en augmentant le dopage et/ou en utilisant des matériaux à faibles gaps [75]. Un pic du courant élevé est un indice d'une faible résistance (R_{JT}). Dans cette partie, nous étudions trois différentes JTs : $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}/\text{In}_{0,51}\text{Ga}_{0,49}\text{P}$ (JT1) et $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}/\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ (JT2) qui vont nous servir d'interconnexion dans la cellule dupliquée $2x\text{GaAs}$. Dans le cas de la cellule $2x\text{In}_{0,51}\text{Ga}_{0,49}\text{P}/2x\text{GaAs}$, nous utilisons $\text{Al}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{As}/\text{Al}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{As}$ (JT3) où les deux matériaux ont un grand gap ($\sim 2,05\text{eV}$) pour éviter l'absorption dans les deux sous-jonctions de $\text{In}_{0,51}\text{Ga}_{0,49}\text{P}$. Cependant, pour connecter les deux sous-jonctions de GaAs dans la cellule dupliquée $2x\text{In}_{0,51}\text{Ga}_{0,49}\text{P}/2x\text{GaAs}$, nous pouvons utiliser une des deux jonctions tunnels JT1 et JT2, car leurs gaps sont supérieurs à celui de GaAs. Il est important de noter que dans la JT1, nous avons choisi l'InGaP pour la région n^{++} en raison de la difficulté de croître un matériau de type p fortement dopé (en particulier en MOCVD) en utilisant un dopant à faible diffusion [152].

Les deux cellules dupliquées sont destinées pour le fonctionnement à des concentrations allant jusqu'à 1000 soleils. Par conséquent, le dopage des JT doit être optimisé afin d'identifier la valeur minimale à partir de laquelle la JT peut être considérée comme quasi-neutre électriquement et donc, fonctionne dans la région 1 de la **Figure 5-6 (f)**. Le **Tableau 5-2** présente les détails des JT étudiées incluant les matériaux, dopage et épaisseur. On note N_A and N_D les densités de dopage des accepteurs (région p^{++}) et donneurs (région n^{++}).

Tableau 5-2 : Matériaux, dopages et épaisseurs des trois JT.

	Couche	Matériau	Épaisseur (nm)	Dopage (cm^{-3})
JT1	p+	$\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}$	40	2×10^{18}
	p++	$\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$	25	N_A
	n++	$\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}$	25	N_D
	n+	$\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}$	40	2×10^{18}
JT2	p+	$\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}$	40	2×10^{18}
	p++	$\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$	25	N_A
	n++	$\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$	25	N_D
	n+	$\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}$	40	2×10^{18}
JT3	p+	$\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.47}\text{P}$	40	1×10^{18}
	p++	$\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$	25	N_A
	n++	$\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$	25	N_D
	n+	$\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.47}\text{P}$	40	2×10^{18}

Nous avons considéré un dopage de type Gaussien à l'interface p^{++}/n^{++} pour prendre en considération le phénomène de diffusion de dopants donneurs dans la région p^{++} et accepteurs dans la région p^{++} [66]. Le dopage Gaussien est programmé à part en langage C puis intégré dans le programme de simulation Atlas (voir l'annexe A.2). La **Figure 5-7** représente le cas de la JT3 $p^{++}\text{-AlGaAs}/n^{++}\text{-AlGaAs}$ dopée $1.1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}/1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. L'épaisseur des jonctions p^{++}/n^{++} est considérée 25 nm dans les deux côtés. Une JT réelle ne consiste pas seulement en une jonction p^{++}/n^{++} , mais aussi des couches adjacentes (c'est-à-dire la couche BSF de la sous-jonction supérieure et la couche fenêtre de la sous-jonction sous-jacente). L'introduction de ces couches permet d'améliorer la simulation pour reproduire correctement le comportement des JT, comme mentionné dans cette référence [153].

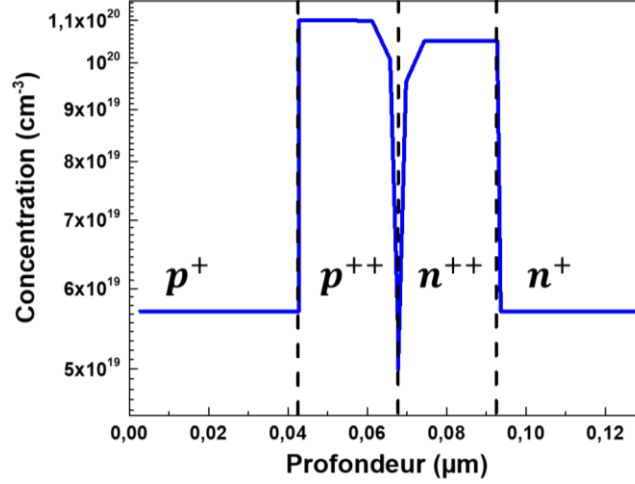


Figure 5-7 : Profil du dopage simulé d'une JT p^{++} -AlGaAs/ n^{++} -AlGaAs.

5.2.4 Résultats de simulation

Nous admettons que les courants générés par les cellules dupliquées n'excèdent pas 40 A/cm^2 qui est l'équivalent de la densité générée par une cellule $2x\text{GaAs}$ à ~ 3000 soleils ou une $2x\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}/2x\text{GaAs}$ à 5400 soleils (la méthode d'estimation est présentée dans la section V.3.2). Les courbes $J(V)$ des JT simulées en fonction de dopage sont présentées à la **Figure 5-8**. Comme prévu, on observe qu'une faible fluctuation au niveau de dopage provoque une grande variation du J_p . Parmi les trois JT, on constate que la TJ1 exige le plus faible dopage pour obtenir un J_p supérieur à 40 A/cm^2 . En effet, un dopage de l'ordre de $5.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} / 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ est suffisant pour obtenir un $J_p = 80 \text{ A/cm}^2$, qui est deux fois plus élevé que la valeur demandée. Alors que dans le cas de JT2, le dopage minimal est de l'ordre de $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} / 8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ pour avoir $J_p = 52 \text{ A/cm}^2$. La JT1 donne des valeurs de J_p très élevées à des dopages considérés très bas pour la JT2. Ce résultat peut s'expliquer par la différence du gap entre $p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ et $n^{++}\text{-In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}$ dans la TJ1 qui donne naissance au phénomène de résonance tunnel dû à la présence d'une deuxième barrière de potentiel autre que celle présente dans la couche $n^{++}\text{-In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}$ [154]. En effet, les électrons peuvent franchir la barrière de potentiel à travers des états résonants à certains niveaux d'énergie. Dans ce cas, le coefficient de transmission total est élevé par rapport au cas avec une seule barrière.

Les résultats de simulation de la JT3 sont illustrés à la **Figure 5-8 (c)**. Cette jonction exige un dopage très élevé de l'ordre de $1.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} / 1.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ pour obtenir un pic du courant de l'ordre de 73.48 A/cm^2 . Par rapport aux JT1 et JT2, le pic de courant de JT3 est caractérisé par

une forte sensibilité pour une légère variation du dopage. En plus, cette jonction nécessite des dopages très élevés $>1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, car son gap est très élevé par rapport aux deux autres jonctions. Pour forcer les électrons à franchir la barrière de potentiel, le dopage doit être augmenté dans les deux côtés de la jonction, ce qui rend la zone de déplétion de plus en plus étroite. Par conséquent, un champ électrique très fort s'établit permettant de réduire la hauteur de barrière, et donc de séparer les porteurs de charges avant qu'ils se recombinent.

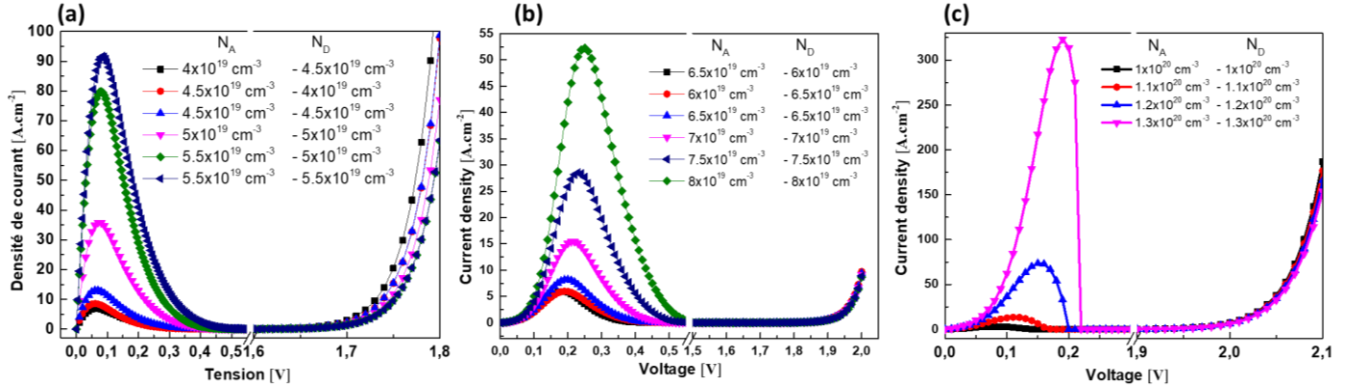


Figure 5-8 : Caractéristique J(V) pour différentes valeurs de dopage; (a) $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}$, (b) $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ et (c) $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}/\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$.

Une relation entre la résistance de la jonction (R_{JT}) et le dopage doit être établie pour identifier la valeur minimale du dopage à partir de laquelle une telle JT est considérée quasi-neutre électriquement. En se basant sur l'étude menée par *F. Wheeldon et al.* [61], on considère la résistance acceptable pour un fonctionnement optimal égale à $5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$. La **Figure 5-9** montre l'évolution de la résistivité intrinsèque des trois jonctions tunnels en fonction du dopage effectif. En prenant en considération la condition citée ci-haut, les valeurs de dopage à considérer pour l'optimisation des cellules dupliquées sont : $5.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} / 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ pour JT1, $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} / 8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ pour JT2 et $1.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} / 1.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ pour JT3.

En pratique, trois problématiques doivent être prises en compte. Premièrement, le J_P dépend non seulement de la concentration des dopants dans les JTs, mais aussi de la nature chimique des dopants [152]. Deuxièmement, il est difficile d'obtenir un dopage très élevé dans des matériaux à large gap, ce qui rend difficile la production des jonctions tunnel utilisables à hautes concentrations [155]. Troisièmement, dans toutes les conditions réelles d'opération des cellules solaires, le flux de la lumière présente des non-uniformités spectrales et en intensité. Pour ces raisons, nous avons considéré des valeurs de J_P suffisamment élevées pour minimiser les risques causés par les jonctions tunnel. Il est important de mentionner que l'utilisation des JTs à très fort dopage (cas de

JT3 par exemple) détériore la qualité des interfaces dans les JTs, ce qui nécessite une optimisation des conditions de croissance épitaxiale (température, flux des gaz, etc.) [156].

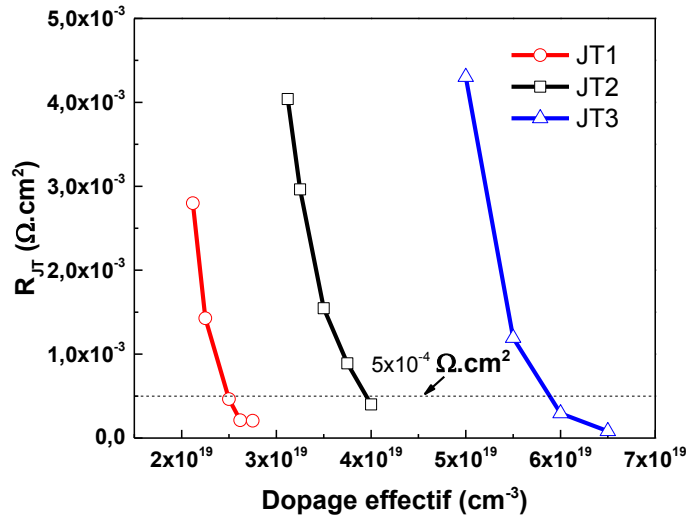


Figure 5-9 : Résistivité intrinsèque des jonctions tunnel en fonction du dopage effectif de la jonction p⁺⁺/n⁺⁺.

5.3 Cellules solaires dupliquées

5.3.1 Description

Si l'on considère les cellules solaires conventionnelles à simple et double jonction comme référence, des cellules solaires dupliquées sont obtenues en dupliquant chaque sous-cellule en plusieurs jonctions p-n (sous-cellules) comme montre la **Figure 5-10** pour le cas 2xGaAs et la **Figure 5-11** pour le cas 2xIn_{0.51}Ga_{0.49}P/2xGaAs. Dans les deux structures dupliquées, les sous-jonctions de haut sont minces pour être transparentes à une partie du spectre solaire, qui sera par la suite absorbé par la sous-jonction de bas.

Dans toutes les structures, le dopage optimal de l'émetteur (semiconducteur de type n) dans chaque sous-jonction est de l'ordre de 1-5.10¹⁸ cm⁻³ qui est suffisamment élevé pour injecter une forte densité de porteurs de charge dans les couches *base* (jonction p), qui seront ensuite acheminées vers le collecteur. En revanche, le dopage dans les couches base varie entre 2x10¹⁷ cm⁻³ et 8x10¹⁷ cm⁻³.

Les couches BSF et fenêtre agissent comme des barrières de potentiel pour les porteurs minoritaires afin de réduire les recombinaisons aux interfaces [132]. Dans notre cas, nous avons

utilisé une couche transparente $\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.47}\text{P}$ de 30-40nm comme une couche fenêtre supérieure avec un gap élevé de 2.36 eV. L'épaisseur de cette couche peut être beaucoup plus élevée en raison de son gap suffisamment élevé. Étant donné que l'hétérojonction formée à l'interface entre la BSF p- $\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}$ et la couche de base p-GaAs dans toutes les sous-jonctions de GaAs est caractérisée par un offset de bande de valence plus élevé par rapport à l'offset de bande de conduction [157], le dopage du BSF devrait être d'environ $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ pour diminuer les barrières de potentiel. Cet effet a été démontré dans [158]. Dans tous les cas, nous avons utilisé une couche buffer p⁺-GaAs de 100 nm et de dopage $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

Couche		Épaisseur (nm)	Dopage (cm^{-3})
ARC1	SiO_2	90	-
ARC2	SiN_2	40	-
n contact	GaAs	100	5×10^{18}
n ⁺ fenêtre	AlInP	40	2×10^{18}
n jonction	GaAs	80	$5,5 \times 10^{18}$
p jonction	GaAs	80	8×10^{17}
p ⁺ BSF	InGaP	40	2×10^{18}
JT1 ou JT2			
n ⁺ fenêtre	InGaP	40	2×10^{18}
n jonction	GaAs	100	2×10^{18}
p jonction	GaAs	3400	5×10^{17}
p ⁺ BSF	InGaP	100	5×10^{18}
p ⁺ buffer	GaAs	100	1×10^{19}
Substrat	p-GaAs		

Figure 5-10 : Détails des structures dupliquées 1xGaAs et 2xGaAs, montrant l'épaisseur et le dopage. L'épaisseur de la couche d'antireflet est aussi mentionnée.

				Couche				Épaisseur (nm)	Dopage (cm ⁻³)
				ARC1	SiO ₂	90	-		
				ARC2	SiN ₂	40	-		
				n contact	GaAs	100	5x10 ¹⁸		
				n ⁺ fenêtre	AlInP	30	2x10 ¹⁸		
				n jonction	InGaP	50	1x10 ¹⁸		
				p jonction	InGaP	50	2x10 ¹⁷		
				p ⁺ BSF	AlInP	30	1x10 ¹⁸		
				JT3					
				n ⁺ fenêtre	AlInP	30	2x10 ¹⁸		
				n jonction	InGaP	100	1x10 ¹⁸		
				p jonction	InGaP	750	2x10 ¹⁷		
				p ⁺ BSF	InGaP	60	2x10 ¹⁸		
				JT1 ou JT2					
				n ⁺ fenêtre	InGaP	30	2x10 ¹⁸		
				n jonction	GaAs	100	1x10 ¹⁸		
				p jonction	GaAs	310	2x10 ¹⁷		
				p ⁺ BSF	InGaP	40	2x10 ¹⁸		
				JT1 ou JT2					
				n ⁺ fenêtre	InGaP	40	2x10 ¹⁸		
				n jonction	GaAs	100	1x10 ¹⁸		
				p jonction	GaAs	3500	2x10 ¹⁷		
				p ⁺ BSF	InGaP	70	3x10 ¹⁸		
				p ⁺ buffer	GaAs	100	1x10 ¹⁹		
				Substrat	p-GaAs				

Couche		Épaisseur (nm)	Dopage (cm ⁻³)
ARC1	SiO ₂	90	-
ARC2	SiN ₂	40	-
n contact	GaAs	100	5x10 ¹⁸
n ⁺ fenêtre	AlInP	40	2x10 ¹⁸
n jonction	InGaP	100	3x10 ¹⁸
p jonction	InGaP	750	8x10 ¹⁷
p ⁺ BSF	AlInP	40	2x10 ¹⁸
p ⁺⁺ JT	AlGaAs	30	8x10 ¹⁹
n ⁺⁺ JT	InGaP	30	8x10 ¹⁹
n ⁺ fenêtre	InGaP	40	2x10 ¹⁸
n jonction	GaAs	100	5x10 ¹⁸
p jonction	GaAs	3400	5x10 ¹⁷
p ⁺ BSF	InGaP	40	5x10 ¹⁸
p ⁺ buffer	GaAs	100	1x10 ¹⁹
Substrat	p-GaAs		

Figure 5-11 : Détails des structures dupliquées 1xGaInP/1xGaAs et 2xGaInP/2xGaAs.

5.3.2 Épaisseurs des jonctions p-n

Dans cette section, nous allons calculer les valeurs d'épaisseur de différentes sous-jonctions, requises pour réaliser l'accord du courant.

Dans une structure donnée, l'intensité de la lumière dépend de la distance parcourue z et du coefficient d'absorption α du matériau, tel que donné par la loi de Beer-Lambert :

$$I(z, \lambda) = I_0(\lambda) \exp(-\alpha(\lambda) \cdot z) \quad (5.44)$$

où I_0 est l'intensité de la lumière incidente. La profondeur de pénétration de la lumière est donnée par :

$$\delta = 1/\alpha \quad (5.45)$$

Le courant généré par une cellule dépend non seulement de la quantité de photons absorbés, mais aussi de leurs énergies. Par conséquent, dans les cellules dupliquées, l'épaisseur de chaque sous-jonction p-n est soigneusement estimée de telle sorte qu'elle réalise le compromis entre les deux paramètres (quantité et énergie des photons), et donc produire presque le même courant J_{sc} . Ce dernier est calculé pour chaque sous-jonction p-n en utilisant un algorithme Matlab qui consiste à intégrer la loi de Beer Lambert sur le spectre solaire, tel que donné par la formule suivante :

$$J_{sc} = \frac{q}{hc} \int \lambda I(\lambda) EQE(\lambda) d\lambda \quad (5.46)$$

où la puissance de spectre $I(\lambda)$ est considérée par unité de longueur d'onde et de surface. $EQE(\lambda)$ est l'efficacité quantique externe calculée à partir de l'efficacité quantique interne $IQE(\lambda)$, la réflectance $R(\lambda)$, coefficient d'absorption $\alpha_i(\lambda)$ et l'épaisseur h_i de la couche i :

$$EQE(\lambda) = IQE(\lambda) (1 - R(\lambda) - \exp(-\alpha_i(\lambda) \cdot h_i)) \quad (5.47)$$

On note que $EQE(\lambda)$ totale est la somme de toutes les $IQE(\lambda)$ sur toutes les couches constituent la sous-cellule. Les valeurs de $IQE(\lambda)$ pour les matériaux GaAs and InGaP sont estimées à partir de la référence [158]. Le **Tableau 5-3** montre les valeurs d'épaisseur obtenues et les courants J_{sc} correspondants. Les valeurs d'épaisseur obtenues seront utilisées comme référence dans les simulations Atlas.

Tableau 5-3 : Valeurs théoriques de courant J_{SC} à 1 soleil et épaisseur équivalent pour les deux cellules dupliquées 2xGaAs et 2xIn_{0.51}Ga_{0.49}P/2xGaAs.

	Jonction		Épaisseur (nm)	J_{SC} (mA.cm ⁻²) à 1 soleil
2xGaAs	Jonction 1	n-GaAs	80	13.91
		p-GaAs	80	
	Jonction 2	n-GaAs	100	13.95
		p-GaAs	3400	
2xInGaP/2xGaAs	Jonction 1	n-InGaP	50	7.50
		p-InGaP	50	
	Jonction 2	n-InGaP	100	7.52
		p-InGaP	500	
	Jonction 3	n-GaAs	100	7.53
		p-GaAs	310	
	Jonction 4	n-GaAs	100	7.55
		p-GaAs	3400	

Il est important de souligner que ce modèle analytique utilise les valeurs tabulées du coefficient d'extinction k qui sont adoptées pour la simulation par Atlas. Il calcule ensuite les valeurs du coefficient d'absorption et de profondeur de pénétration pour chaque longueur d'onde. Ces calculs nous permettent de déterminer la gamme de longueurs à absorber par chaque sous-jonction dans les cellules dupliquées.

5.3.3 Réflectance

Dans le but de réduire les réflexions de la lumière sur la surface frontale des cellules, nous avons utilisé une double couche d'antireflet SiO₂/SiN. Cette configuration est largement utilisée dans la littérature et présente une réflectance mesurée inférieure à 5% dans l'intervalle 400-1000 nm [159], [160]. La réflectance d'une cellule 2xGaAs avec et sans double couche d'antireflet est tracée à la **Figure 5-12**. La simulation de réflectance est effectuée par Atlas en utilisant le modèle de la matrice de transfert décrit dans la section 5.1.4.2.

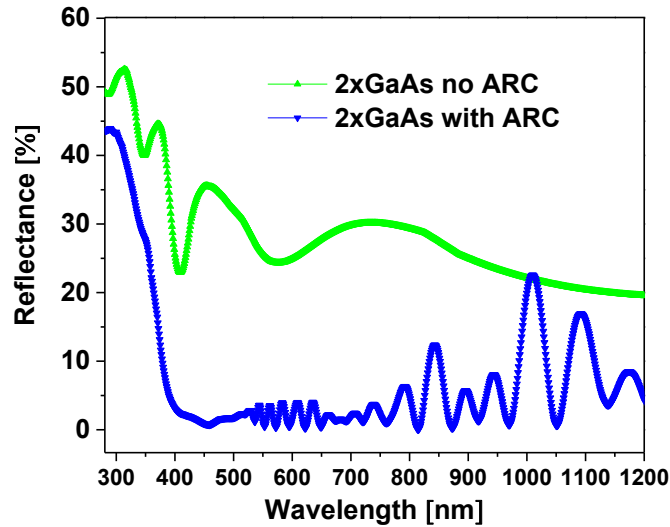


Figure 5-12 : Réflectance en fonction de la longueur d'onde pour une cellule 2xGaAs avec et sans bicouche d'antireflet SiO₂/SiN.

Le dépôt de cette bicouche améliore significativement l'absorption dans la gamme d'absorption de GaAs et de In_{0.51}Ga_{0.49}P (c.-à-d. 400-1000 nm). La réflectance moyenne est inférieure à 5% pour une épaisseur optimale de 90 nm/40 nm. Il est important de noter que les indices de réfraction (n et k) utilisés dans la simulation pour les deux couches SiO₂ and SiN, sont obtenus expérimentalement dans notre laboratoire.

5.3.4 Paramètres physiques et calibration

Les paramètres physiques considérés dans cette étude sont résumés dans le **Tableau 5-4**. Tous les paramètres sont considérés à 300K. Puisque ces paramètres ont une grande influence sur les résultats de simulation, nous avons abordé des valeurs réelles extraites de la littérature. Les valeurs de durée de vie sont considérées pour des dopages supérieurs à $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ [17], [161].

Les propriétés de transport au niveau des interfaces sont simulées en considérant les deux paramètres suivants : la densité de charges à l'interface et la vitesse de recombinaison surfacique. Les valeurs de cette dernière pour les différents matériaux sont présentées dans le **Tableau 5-4**. Le GaAs possède la vitesse de recombinaison la plus élevée alors que les matériaux en aluminium ont une vitesse de recombinaison relativement faible [162].

Tableau 5-4 : Paramètres physiques des matériaux utilisés dans les simulations Atlas.

Paramètres	GaAs	Al _x Ga _{1-x} As	In _{0.51} Ga _{0.49} P	In _{0.53} Al _{0.47} P	Référence
E _g (eV)	1.42	1.92 for x=0.4 2.05 for x=0.7	1.89	2.36	[136]
Affinité électronique χ (eV)	4.07	3.63 for x=0.4 3.54 for x=0.7	4.01	3.73	[17]
Concentration intrinsèque de porteurs n _i (cm ⁻³)	2.1x10 ⁶	2x10 ³ for x=0.4 1x10 ² for x=0.7	8x10 ³	2x10 ²	[163]
Durée de vie des électrons; trous (ns)	10; 50	1; 1	0.6; 3	0.1; 0.1	[17]
Coefficient radiatif (cm ³ /s)	2x10 ⁻¹⁰	1x10 ⁻¹⁰	1x10 ⁻¹⁰	1x10 ⁻¹⁰	[17]
Coefficient Auger (cm ⁶ /s)	1x10 ⁻³⁰	1x10 ⁻³⁰	1x10 ⁻³⁰	1x10 ⁻³⁰	[17]
Masses effectives des électrons; trous (m [*] _{e,h} /m ₀)	0.067; 0.48	0.088; 0.72	0.35; 0.67	0.35; 0.67	[136]
Vitesse de recombinaison surfacique (cm/s)	4.2x10 ⁶	90 for x=0.4 8x10 ² for x=0.7	2x10 ⁴	1x10 ²	[162], [164]

Il est démontré expérimentalement qu'un rétrécissement de gap se produit en présence d'un niveau d'impuretés important [165]. À très fort dopage ($>1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), la densité d'état des niveaux dopants proches de la BC ou de la BV forme un quasi-continuum, ce qui se traduit par une réduction du gap du matériau appelée *Band Gap Narrowing* (BGN). Ce phénomène rend la génération plus aisée, puisque la barrière à franchir est plus faible, ce qui augmente le courant d'obscurité dans le dispositif. Nous avons introduit ce mécanisme dans la simulation Atlas en utilisant le modèle analytique décrit par *Klaassen et al* [166].

Afin de prendre en considération les éventuelles non-uniformités du potentiel électrostatique le long de l'interface métal/semi-conducteur, les contacts ohmiques ont été simulés comme des électrodes en adoptant une résistance de contact égale à $5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ dans les deux contacts, frontal et arrière. Il est important de souligner que les valeurs de résistance de contact utilisées dans nos simulations sont dans la limite supérieure des valeurs obtenues par *Huo et al.* pour des contacts réels [18].

La validation d'un tel modèle de simulation peut être effectuée de préférence par la comparaison entre les résultats du modèle à ceux expérimentaux. Dans notre cas, la calibration du modèle exige l'obtention des structures détaillées des cellules solaires incluant les valeurs de dopages et épaisseurs de toutes les couches ainsi que les figures de mérites sur une large gamme de concentrations. Nous utilisons une cellule de GaAs fabriquée par *Dai et al* dont les performances sont mesurées en utilisant le spectre AM1.5G [66] (voir la **Figure 5-13 (a)**). Nous avons utilisé les mêmes paramètres de simulation du **Tableau 5-4**.

En raison d'impact majeur de la couche de fenêtre la plus haute $\text{Al}_{0.53}\text{In}_{0.47}\text{P}$ sur l'efficacité de collection des porteurs, les durées de vie des porteurs dans cette couche sont libérées pendant la calibration afin de trouver les valeurs optimales qui s'approchent de la réalité. La raison est que cette couche est certainement affectée par plusieurs facteurs tels que: la recombinaison de surface due au contact direct avec les couches d'anti-réflexion, la faible longueur de diffusion des porteurs minoritaires (c'est-à-dire les trous dans ce cas) en raison de la forte teneur en aluminium ($\geq 40\%$) [167] et l'incorporation d'oxygène qui peut former des pièges profondes [168]. À partir de calibration, la valeur de durée de vie extraite est de l'ordre de 0.1 ns, ce qui est très proche de la valeur trouvée dans la référence [17].

Les résultats de calibration sont illustrés à la **Figure 5-13 (b)** montrant l'évolution de V_{OC} , efficacité et FF en fonction de la concentration. En raison de la simplicité du dispositif, il est possible d'obtenir un accord très proche entre les résultats simulés et expérimentaux. En comparant les principales figures de mérite en fonction de la concentration, un bon accord entre les mesures expérimentales et les calculs théoriques est observé. En revanche, le FF présente l'écart absolu le plus élevé d'environ 1% au-dessus du pic de concentration à 100 soleils. Cela est lié à la recombinaison non radiative [169] dans la cellule qui n'est pas évidente à simuler avec précision.

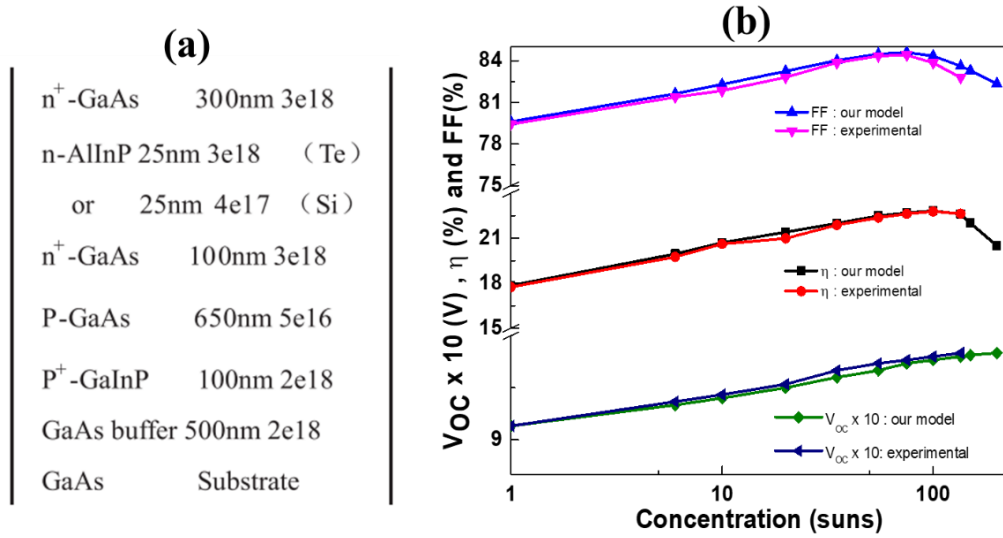


Figure 5-13 : (a) Section transversale de la cellule solaire GaAs utilisée pour la calibration (extraite de [66]); (b) résultats de calibration.

5.3.5 Limitation par les jonctions tunnel sous concentration

Dans cette partie, nous allons étudier les limitations causées par la fluctuation du dopage des jonctions tunnel sur les performances d'une cellule solaire sous concentrations. Nous étudions le cas de la cellule 2xGaAs (**Figure 5-10**) avec la JT1 sous plusieurs concentrations : 400; 800; 1100 et 1200 soleils. Le dopage de la JT1 est considéré très faible de l'ordre de $4.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ / $4.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. La **Figure 5-14** montre l'évolution de la caractéristique $J(V)$.

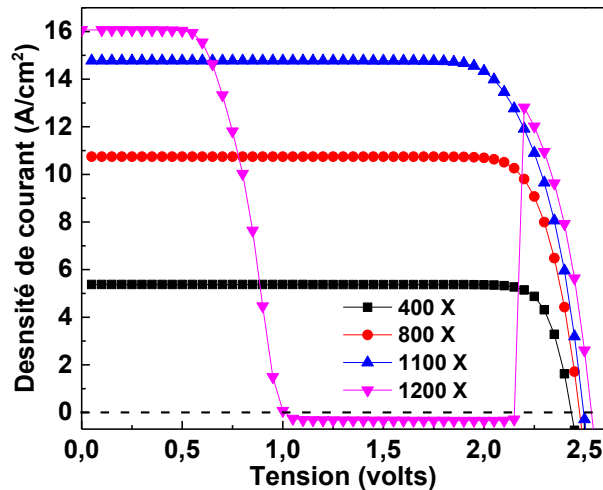


Figure 5-14 : Caractéristique $J(V)$ de la cellule 2xGaAs sous différentes concentrations.

Nous observons que pour les trois premières concentrations, le comportement de la caractéristique est normal et que le J_{SC} augmente linéairement en fonction du facteur de concentration. Dans cette gamme de concentrations, le J_P de la JT est très élevé ($\sim 14 \text{ A/cm}^2$) pour permettre aux porteurs de la traverser avec la plus faible résistance série.

Si l'irradiation augmente jusqu'à 1200 soleils, le courant généré par la cellule atteint 15.9 A/cm^2 , qui est suffisamment élevé par rapport au J_P . Dans ce cas de figure, les trois régions de la JT (1; 2 et 3 de la **Figure 5-6 (f)**) sont présentes dans la caractéristique $J(V)$ de la cellule 2xGaAs. Ce phénomène a été étudié par *M. Babar et al* [170]. À 1200 soleils et à faibles tensions ($\leq 1\text{V}$), la cellule 2xGaAs se comporte comme une seule cellule de GaAs, car la JT bloque les porteurs de charges entre les deux sous-jonctions. Au fur et à mesure que la polarisation augmente, la cellule suit le comportement de résistance différentielle négative de la JT. En revanche, à très fortes tensions ($\geq 2.25\text{V}$), les porteurs de charges traversent la JT par diffusion de la BC du côté n^{++} vers la BC du côté p^{++} , ce qui explique l'augmentation rapide du courant généré.

5.3.6 Résultats

5.3.6.1 Étude à 1 soleil

Dans cette section, nous étudions les figures de mérites des cellules solaires dupliquées (le code de simulation Atlas d'une cellule 2xGaAs est présenté en annexe **A.1**). Nous présentons également les performances des cellules conventionnelles pour la comparaison. Pour mieux comprendre l'effet de duplication sur l'absorption dans les cellules dupliquées, nous présentons à la **Figure 5-15** le taux de photogénération des deux cellules 1xGaAs et 2xGaAs. La simulation est effectuée à 1 soleil en utilisant le spectre AM1.5D.

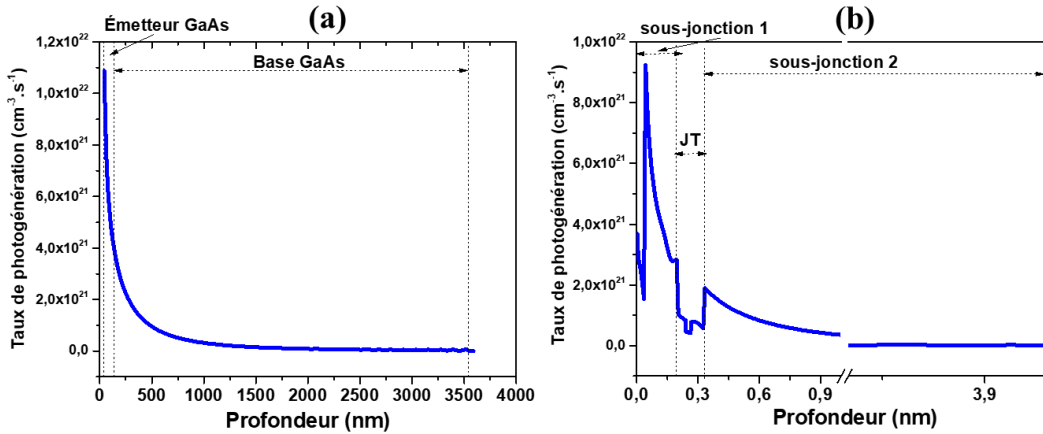


Figure 5-15 : Variations des taux de photogénération à travers la cellule 1xGaAs (a) et 2xGaAs (b).

Nous observons dans les deux cas un taux de photogénération très élevé tout près de la couche métallique du contact, qui diminue de manière exponentielle et tend vers zéro. Cette diminution est due à un taux de recombinaison qui augmente avec la profondeur à cause des faibles durées de vie des porteurs minoritaires.

Nous avons ensuite calculé la caractéristique $J(V)$ à 1 soleil des quatre cellules des figures **Figure 5-10** et **Figure 5-11**. L'objectif était de valider le fonctionnement aux conditions standards à 1 soleil avant d'effectuer des simulations à hautes concentrations. Comme prévu, puisque toutes les sous-jonctions sont connectées en série, les cellules dupliquées opèrent à des tensions deux fois plus grandes que celles des cellules classiques : $V_{OC}(2xGaAs) \geq 2 V_{OC}(1xGaAs)$ et $V_{OC}(2xIn_{0.51}Ga_{0.49}P/2xGaAs) \geq 2 V_{OC}(1xIn_{0.51}Ga_{0.49}P/1xGaAs)$. En ce qui concerne le courant, nous avons $J_{SC}(2xGaAs) \approx 1/2 J_{SC}(1xGaAs)$ et $J_{SC}(2xIn_{0.51}Ga_{0.49}P/2xGaAs) \approx 1/2 J_{SC}(1xIn_{0.51}Ga_{0.49}P/1xGaAs)$.

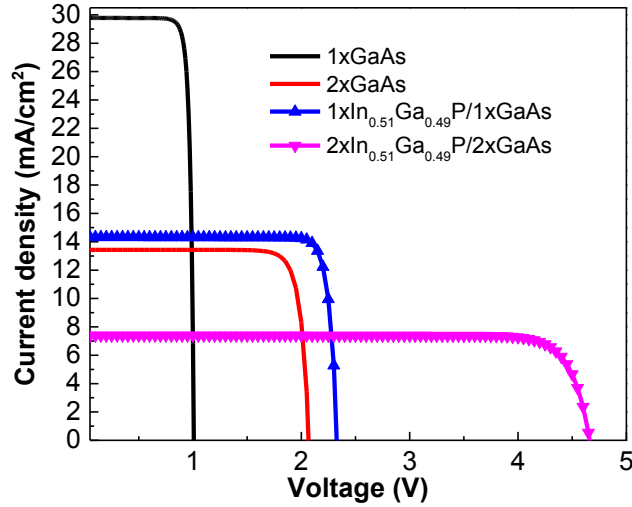


Figure 5-16 : Caractéristique JV des quatre cellules solaires.

Les valeurs de résistance série globales des cellules ont été calculées à partir des courbes J(V) en utilisant le modèle analytique développé par *Khan et al.* [139]. Le **Tableau 5-5** résume les résultats obtenus.

Tableau 5-5 : Valeurs de résistance série calculées à partir des courbes J(V) à 1 soleil.

	1xGaAs	2xGaAs	1xIn _{0.51} Ga _{0.49} P/1xGaAs	2xIn _{0.51} Ga _{0.49} P/2xGaAs
R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	2.5×10^{-3}	2.14×10^{-2}	1.6×10^{-2}	8×10^{-2}

Les valeurs de R_s dans les cellules dupliquées sont supérieures par rapport aux cellules classiques à cause de l'ajout de plusieurs couches, ce qui augmente la quantité de matière ainsi que le nombre d'hétérojonctions. Ces résultats montrent que le gain en efficacité dans les cellules dupliquées provient de la réduction des pertes résistives $J_{sc}^2 R_s$ et non pas de la résistance en série elle-même. Les résultats de simulation Atlas des cellules solaires sont présentés au **Tableau 5-6**. Ces résultats montrent que les cellules dupliquées ne présentent aucun intérêt de point de vue rendement électrique à 1 soleil ou à faibles concentrations.

Tableau 5-6 : Performances des cellules solaires conventionnelles et dupliquées à 1 soleil.

	1xGaAs	2xGaAs	1xIn _{0.51} Ga _{0.49} P/1xGaAs	2xIn _{0.51} Ga _{0.49} P/2xGaAs
V _{OC} (V)	1.00	2.07 pour JT1 2.07 pour JT2	2.3	4.7
J _{SC} (mA.cm ⁻²)	29.8	13.3 pour JT1 13.4 pour JT2	14.5	7.4
FF (%)	87.6	86.8 pour JT1 86.3 pour JT2	87.5	85.1
Efficacité (%)	26.4	26.4 pour JT1 26.7 pour JT2	29.7	29.5

5.3.6.2 Étude à hautes concentrations

Sous Atlas, le taux de photogénération est calculé à chaque nœud en utilisant la valeur locale du champ électrique. Dans cette section, nous avons calculé les caractéristiques J(V) des différentes cellules sur une large gamme de concentrations. Ensuite, nous avons calculé les valeurs de V_{OC} et J_{SC}. Les résultats sont illustrés à la **Figure 5-17**. Les performances de 2xGaAs et 2xIn_{0.51}Ga_{0.49}P/2xGaAs sont calculées respectivement dans les plages 1-1200 soleils et 1-5000 soleils.

Nous constatons que le V_{OC} croît d'une manière logarithmique en fonction de la concentration, conformément à la théorie [13]. En plus, les valeurs de V_{OC} sont également proportionnelles au nombre de sous-jonctions p-n empilées dans la cellule. Lorsqu'on utilise la JT1 pour connecter les deux sous-cellules dans la cellule 2xGaAs, le V_{OC} est relativement élevé par rapport au cas de JT2 (voir **Figure 5-17 (a)**). Ceci peut s'expliquer par la chute de tension élevée dans la JT2. On note que la chute de tension est la tension qui correspond au J_p. Si on revient aux deux **Figure 5-8 (a)** et **(b)**, on observe que la chute de tension dans la JT1 est de l'ordre de 80 mV au dopage utilisé 4.5x10¹⁹ cm⁻³ / 4.5x10¹⁹ cm⁻³, alors que dans la JT2, la chute est de l'ordre de 250 mV au dopage 8x10¹⁹ cm⁻³ / 8x10¹⁹ cm⁻³. Une valeur de 250 mV correspond à une perte de tension de l'ordre de 10% qui est très relativement élevée par rapport à la perte dans la JT1 qui ne dépasse pas 3%.

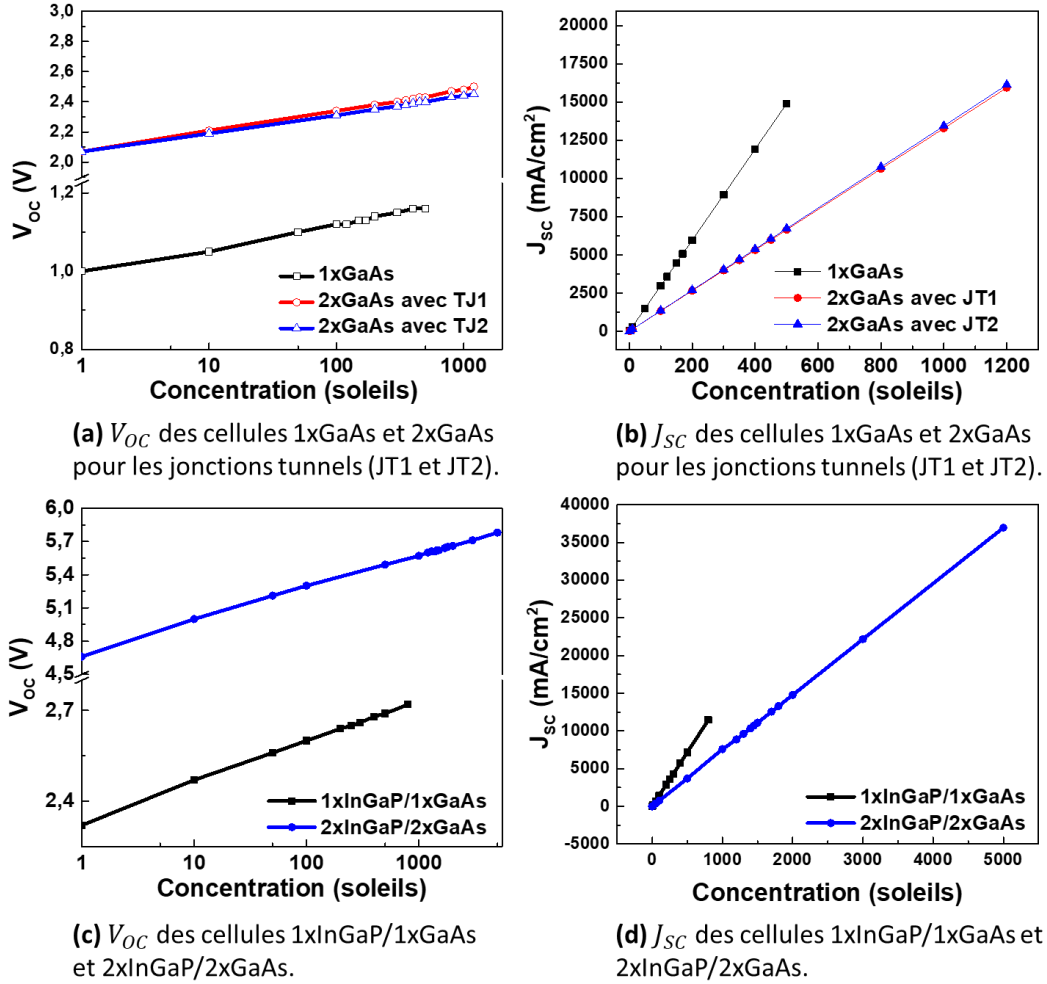


Figure 5-17 : Évolution de V_{OC} et J_{SC} en fonction de concentration.

Les cellules dupliquées permettent également l'utilisation des sous-jonctions minces et fortement dopées. En effet, plus la sous-jonction est mince plus un dopage fort est nécessaire pour augmenter le nombre de porteurs photogénérés [147]. Ceci permet d'augmenter la séparation du niveau de Fermi (*quasi-Fermi level splitting*) et donc, d'augmenter le V_{OC} . Ce phénomène a été observé expérimentalement et analysé théoriquement par plusieurs groupes de recherche [80], [171]. Ce phénomène justifie pourquoi les cellules dupliquées étudiées dans ce manuscrit ont des valeurs de V_{OC} relativement supérieures à $2xV_{OC}$ d'une cellule standard, comme montré dans le **Tableau 5-6**. La **Figure 5-18** montre le digramme de bandes simulé de la cellule 2xGaAs dans lequel les séparations du niveau de Fermi sont de l'ordre de 1.28 eV et 1.20 eV pour les sous-jonctions 1 et 2, respectivement. Donc, une différence de 80 meV a permis d'améliorer le V_{OC} de la cellule 2xGaAs.

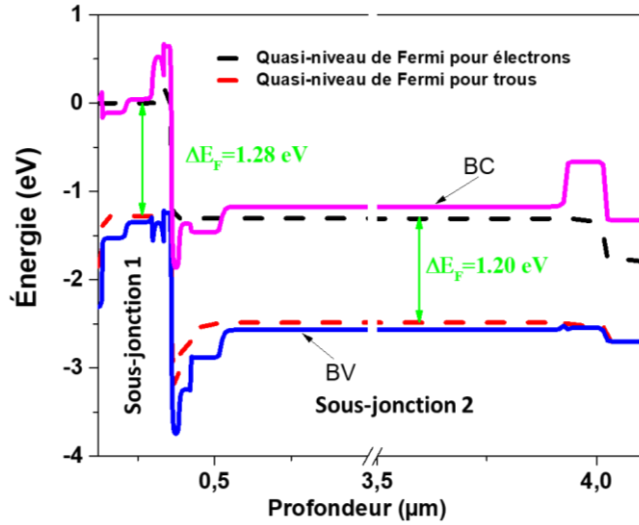


Figure 5-18 : Diagramme de bande de la cellule 2xGaAs montrant la séparation des niveaux de Fermi dans les deux sous-jonctions. La simulation est réalisée au point de puissance maximale, soit $V_M=1.87$ V.

Le J_{SC} varie linéairement en fonction de la concentration et se réduit également proportionnellement en augmentant le nombre de sous-jonctions dans les cellules dupliquées. À une concentration donnée, les cellules dupliquées 2xGaAs et 2xIn_{0.51}Ga_{0.49}P/2xGaAs délivrent la moitié du courant des cellules conventionnelles. Ceci réduit les pertes Joule $R_s J_{SC}^2$ à $R_s J_{SC}^2/4$.

En utilisant la puissance du faisceau incident ainsi que la géométrie de la cellule solaire, nous pouvons remonter au facteur de forme FF puis à l'efficacité. L'évolution de ces paramètres en fonction de concentration est représentée sur la **Figure 5-19**. D'après les **Figure 5-19 (a)** et **(c)**, le FF croît d'une manière logarithmique dans les plages de concentrations suivantes : [1-10 soleils] pour 1xGaAs, [1-100 soleils] pour 2xGaAs, [1-100 soleils] pour 1xIn_{0.51}Ga_{0.49}P/1xGaAs et [1-500 soleils] pour 2xIn_{0.51}Ga_{0.49}P/2xGaAs. Cela démontre que le FF est positivement affecté par l'augmentation du V_{OC} dans ces intervalles de concentrations. Le comportement du FF de 2xGaAs pour JT1 et JT2 confirme que l'amélioration du V_{OC} permet également d'améliorer le FF.

Il est important de souligner que, par rapport aux cellules classiques, le FF pour les cellules dupliquées est faible aux faibles concentrations pour deux raisons : (i) une résistance série élevée comme nous avons déjà mentionnée au **Tableau 5-5**, et (ii) des pertes par réflexion élevées parce que les cellules dupliquées possèdent plus d'interfaces (c.-à-d. couches) que les cellules simples.

Cependant, le FF chute d'une manière drastique en augmentant la concentration lorsque les pertes résistives $R_s J_{SC}^2$ deviennent limitantes. On observe aussi que pour les cellules dupliquées, le FF

reste relativement élevé sur une large plage de concentrations grâce au courant réduit qui minimise les pertes $R_s J_{sc}^2$.

Nous avons ensuite calculé l'efficacité en fonction de concentration. Les résultats sont présentés aux **Figure 5-19 (b) et (d)**. On constate que l'efficacité augmente d'une manière logarithmique en fonction de la concentration et que le pic d'efficacité se produit à une concentration supérieure à celui de FF. Ceci est dû à l'augmentation du V_{OC} en fonction de $\ln(X)$.

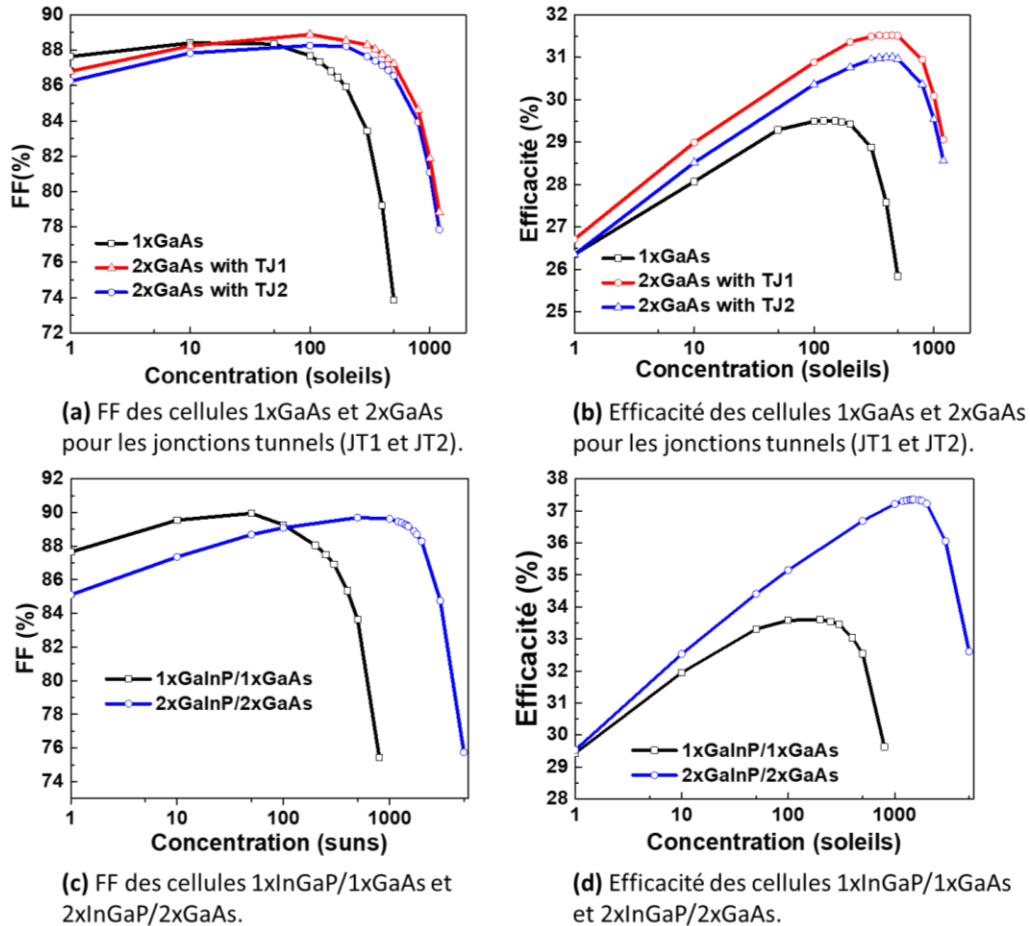


Figure 5-19 : Évolution de facteur de forme et efficacité des cellules solaires en fonction de concentration.

Les maximums d'efficacité et les concentrations correspondantes pour les quatre cellules sont présentés dans le **Tableau 5-7**. Ces résultats sont prometteurs vu que les records actuels d'efficacité ne dépassent pas 29.3% à 49.5 soleils pour une cellule à simple jonction de GaAs [172] et 32.6% à 1000 soleils pour une cellule à deux jonctions $1xIn_{0.51}Ga_{0.49}P/1xGaAs$ [173].

Tableau 5-7 : Valeurs d'efficacité maximale et niveau de concentration correspondant.

	Maximum d'efficacité	Concentration
1xGaAs	29.5%	150 soleils
2xGaAs	31.52% avec JT1 31% avec JT2	450 soleils
1xIn _{0.51} Ga _{0.49} P/1xGaAs	33.64%	150 soleils
2xIn _{0.51} Ga _{0.49} P/2xGaAs	37.36%	1500 soleils

Pour des niveaux de concentrations supérieures, l'efficacité chute drastiquement en augmentant la concentration. Ceci est dû à la chute du FF ou du rapport $FF(X)/FF(1)$, dans l'équation (2.8), à cause des pertes résistives. En plus, la chute d'efficacité à très hautes concentrations (1200 soleils pour 2xGaAs et ≥ 3000 soleils pour 2xIn_{0.51}Ga_{0.49}P/2xGaAs) est liée aussi aux limitations causées par les jonctions tunnel.

5.3.6.3 Sensibilité aux variations d'épaisseur

Afin d'étudier la sensibilité aux variations d'épaisseur dans les régions absorbantes des cellules dupliquées, nous avons simulé les performances (J_{SC} et l'efficacité) de la cellule 2xGaAs tout en variant individuellement les épaisseurs des deux sous-jonctions 1 et 2. Nous avons considéré la concentration 450 soleils où l'efficacité est maximale. Les résultats obtenus sont présentés à la **Figure 5-20 (a) et (b)**.

On constate que le courant est très influencé par la fluctuation au niveau d'épaisseur de la sous-jonction de haut et que la courbe présente deux régions. Dans la région 1, la sous-jonction 1 est limitante en courant, car son épaisseur n'est pas assez élevée pour absorber suffisamment de photons et donc produire assez de porteurs photogénérés. Dans la région 2, la sous-jonction 2 est limitante puisque la sous-jonction 1 a une épaisseur suffisamment élevée pour générer assez de porteurs et donc délivrer un courant élevé par rapport à celui de la sous-jonction 2. Dans cette région, une perte d'efficacité de l'ordre de 2% est observée si l'épaisseur varie de 160 nm à 200nm. Le compromis entre ces deux régions est réalisé pour une épaisseur de 160 nm. Ceci va balancer le courant entre les deux sous-jonctions pour obtenir la plus haute efficacité.

Concernant l'épaisseur de la sous-jonction 2, nous avons changé que l'épaisseur l'émetteur (n-GaAs) entre 50 nm et 300 nm avec un pas de 50 nm. D'après la **Figure 5-20 (a)**, les performances sont moins sensibles aux fluctuations d'épaisseurs par rapport au premier cas. Cependant, si l'épaisseur est suffisamment élevée (>250 nm), les porteurs de charges photogénérés peuvent se recombinier avant d'être injectées dans la couche base (p-GaAs). Ceci réduit le courant électrique et l'efficacité.

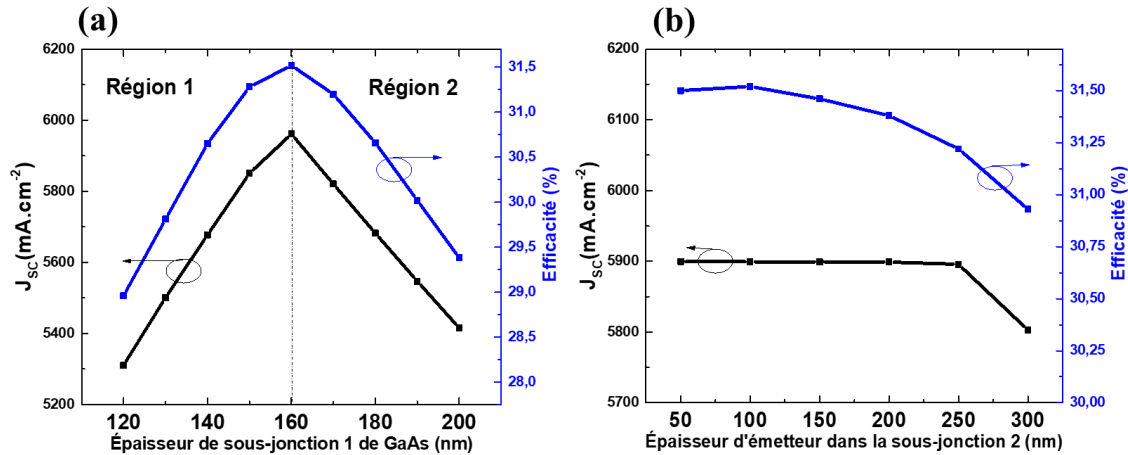


Figure 5-20 : Évolution de J_{sc} et d'efficacité de la cellule 2xGaAs en fonction de : (a) l'épaisseur de la sous-jonction 1 ; (b) épaisseur d'émetteur de la sous-jonction 2. Seule la JT1 est considérée.

5.4 Conclusion du chapitre

Ce dernier chapitre a été consacré principalement à l'étude des structures à jonctions dupliquées sous concentration par le logiciel Atlas. Des simulations des jonctions tunnel ont été effectuées également au début du chapitre pour optimiser leur dopage.

Dans un premier temps, nous avons présenté le logiciel Silvaco et ses outils, en particulier le simulateur Atlas. Ensuite, nous avons expliqué le modèle de dérive-diffusion ainsi que les modèles physiques utilisés (mobilité, comportement optique, effet tunnel, etc.). Dans la deuxième partie, nous avons proposé une JT pour étudier les différents mécanismes d'effet tunnel mis en jeu. Ensuite, trois structures des jonctions tunnels différentes ont été étudiées afin d'identifier le dopage permettant d'obtenir de meilleures performances en termes de J_p et de résistance série. L'étude a montré que le J_p et la résistance série d'une telle jonction tunnel dépend de son gap et de son dopage. Les résultats d'optimisation montrent que les trois JTs peuvent fournir des résistances

inférieures à $5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ aux valeurs de dopage supérieures ou égale à : $5.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ / $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ pour JT1, $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ / $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ pour JT2 et $1.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ / $1.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ pour JT3.

Dans la troisième partie du chapitre, les cellules solaires dupliquées sont décrites en mettant en valeur le rôle des différentes couches. Ensuite, nous avons estimé les épaisseurs des différentes sous-jonctions qui mènent à l'accord du courant. Puis, nous avons présenté la réflectance d'une cellule solaire 2xGaAs en utilisant la double couche d'anti-réflexion SiO_2/SiN pour laquelle l'épaisseur était optimisée, de l'ordre de 90nm/40nm, pour atteindre la plus faible réflectance ($\sim 5\%$). Nous avons présenté également les différents paramètres physiques utilisés dans la simulation. Le modèle Atlas a été calibré en se basant sur une cellule solaire à simple jonction de GaAs issue de la littérature.

Finalement, nous avons simulé les cellules dupliquées sur une large gamme de concentration. Grâce à ces modélisations, nous avons démontré l'intérêt des cellules dupliquées pour augmenter l'efficacité à hautes concentrations. Par rapport aux cellules classiques, des gains absolus en efficacité de l'ordre de 2% et 4% sont atteints par les deux cellules 2xGaAs et $2\text{xIn}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}/2\text{xGaAs}$, respectivement.

Chapitre 6. CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

6.1 Sommaire

Dans le domaine du photovoltaïque concentré, la technologie de troisième génération, y compris les cellules MJ, est considérée comme la voie la plus prometteuse pour améliorer l'efficacité. **Le but de ce travail de thèse était de proposer et d'étudier le potentiel d'une nouvelle architecture de cellules solaire: les cellules dupliquées comme une alternative crédible aux cellules MJ conventionnelles, destinées pour le CPV à très haute concentration au-delà de 1000 soleils. L'avantage de ce type d'architecture est qu'il permet de réduire significativement les pertes résistives grâce au partage du spectre solaire sur différentes sous-jonctions de même gap. Une telle technologie offre une opportunité unique de réduction des coûts via une augmentation substantielle du facteur de concentration et du rendement. Du point de vue économique, ce concept a le potentiel de rendre le CPV attractif même dans les régions de faible et moyen taux d'ensoleillement, permettant ainsi une accessibilité à grande échelle. Le travail s'était focalisé principalement sur la conception via simulation multiphysique et par méthode d'éléments finis. Ci-dessous, les principales réalisations de cette thèse sont résumées.**

Dans le chapitre 1, nous avons mis le projet dans son contexte afin d'identifier les facteurs qui ont déclenché nos travaux de recherches. Nous avons également mis l'accent sur la problématique générale du coût relativement élevé d'électricité produite par les cellules solaires ainsi que la problématique spécifique des pertes résistives sous concentration solaire. **Il a été conclu qu'il y a un besoin urgent de développer de nouvelles architectures des cellules solaires pour contribuer à l'accélération de l'adoption des énergies vertes.** Nous avons ensuite présenté les objectifs à atteindre dans ce projet.

Dans le chapitre 2, nous avons présenté l'intérêt des cellules MJ ainsi que l'impact et les limitations liées à la concentration solaire. Une analyse exhaustive est présentée concernant l'état de l'art des cellules multi-jonctions sous concentration solaire. Nous avons ainsi mis en évidence, afin d'obtenir de hauts rendements à fortes concentrations solaires, **qu'il est nécessaire de s'orienter vers des structures monolithiques et accordées avec un nombre élevé des jonctions p-n afin**

de réduire les pertes résistives $R_s J_{sc}^2$. Nos travaux sont orientés vers les cellules solaires à jonctions dupliquées qui permettent de contourner la problématique du désaccord de maille pour augmenter le nombre de sous-jonctions dans les cellules solaires.

Le chapitre 3 est présenté sous forme d'un article de journal dans lequel nous avons réalisé des simulations multiphysiques basées sur le modèle « *Detailed Balance* » incluant des pertes résistives pour tenter d'augmenter l'efficacité avec la concentration solaire. Cette étude a été effectuée pour des cellules solaires dupliquées à base de GaAs et la triple-jonction InGaP/GaAs/Ge. **Les résultats ont montré que le concept permet ainsi de réduire significativement les pertes résistives sous fortes concentrations grâce au courant réduit.** Cette étude est combinée avec une étude simplifiée du coût relatif pour le cas de la cellule 3xInGaP/3xGaAs/3xGe. **Nous avons conclu que cette structure a le potentiel de réduire le coût d'électricité via l'augmentation du facteur de concentration et d'efficacité. Le modèle économique développé suggère une réduction de l'ordre de 30 % est possible dans le cas idéal où le coût du système de concentration (suiveur et optique) n'est pas affecté par la concentration. Alors qu'une réduction d'environ 12% est prévisible dans un cas plus réaliste où le coût du système de concentration est augmenté de 30% avec la concentration.**

Le chapitre 4 est présenté aussi sous forme d'un article de conférence et s'est consacré à la validation expérimentale du concept des cellules dupliquées à travers la caractérisation d'une cellule 3xGaAs. Cette étape nous a permis aussi de calibrer le modèle de simulation par Atlas. **On a aussi proposé quelques solutions novatrices pour améliorer la croissance et la caractérisation de ce type de cellules.** Enfin, nous avons étudié via simulation Atlas, la cellule 3xGaAs sur une large gamme de concentrations. **Les résultats ont confirmé qu'une telle cellule devrait fonctionner efficacement jusqu'à 3500 soleils avec une efficacité de l'ordre de 33%. Ce qui représente une augmentation substantielle du rendement de 2.5% par rapport à une cellule de GaAs standard sous 258 soleils.**

Le chapitre 5 a été consacré principalement aux simulations, par Atlas, des jonctions dupliquées sous concentration solaire. Nos modèles ont été validés par des résultats expérimentaux dans la littérature. Des simulations des jonctions tunnel ont été effectuées également au début du chapitre pour optimiser leur dopage avant d'être intégrées dans les cellules dupliquées. Le dopage a été optimisé de telle sorte que la résistance tunnel n'excède pas $5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$. **Ces études ont montré que les jonctions tunnel sont des composantes critiques dans le développement des cellules**

dupliquées et qui nécessitent un effort considérable pour les optimiser. Après avoir sélectionné le dopage optimal de trois différentes jonctions tunnel ($p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/n^{++}\text{-In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}$; $p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/n^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ et $p^{++}\text{-Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/n^{++}\text{-Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$), nous avons simulé les cellules dupliquées $2x\text{GaAs}$ et $2x\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}/2x\text{GaAs}$. **Par rapport aux cellules classiques, des gains absolus d'efficacité de l'ordre de $\sim 2\%$ et $\sim 4\%$ sont atteints par les deux cellules $2x\text{GaAs}$ et $2x\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}/2x\text{GaAs}$, respectivement.**

Nous avons de même étudié dans le chapitre 5 le degré d'amincissement requis dans les sous-jonctions. **Les simulations ont montré que le courant et l'efficacité sont sensibles aux variations d'épaisseur de la sous-jonction de haut, dans la cellule $2x\text{GaAs}$, qu'aux variations d'épaisseur de la sous-jonction de bas.**

6.2 Perspectives

En vue des résultats très prometteurs obtenus et du potentiel important que représentent les cellules solaires dupliquées pour le CPV, plusieurs perspectives se sont dégagées dans le projet. Ci-dessous la liste des perspectives.

- 1- La croissance et fabrication des cellules solaires dupliquées pour le fonctionnement sous concentration solaire : puisqu'il a été montré que le dopage des jonctions tunnel est critique, il serait intéressant, dans un premier lieu, d'entamer la croissance épitaxiale des jonctions tunnel, à part, en se basant sur les résultats de simulation. Ensuite, des caractérisations électriques devront être effectuées pour déterminer les deux facteurs de mérite : la résistance tunnel et le J_p . Cette étape doit être réalisée avec précaution vue que les propriétés électriques des jonctions tunnel dépendent non seulement de la concentration de dopage, mais aussi des propriétés physico-chimiques des dopants. Nous procéderons par la suite à la croissance des cellules dupliquées. Dans ce sens, il serait intéressant de commencer par les cellules dupliquées à faible nombre de couches comme $2x\text{GaAs}$ où le nombre de couches à déposer est faible. Une fois que le procédé d'élaboration est maîtrisé, nous pourrons entamer la croissance/fabrication des cellules plus complexes.
- 2- Concernant les perspectives sur la conception sous le logiciel Atlas, il est à présent nécessaire d'approfondir l'étude sur les mécanismes physiques mis en jeu (tels que le recyclage de photons, le couplage luminescent, etc.) en vue d'optimiser d'autres structures avec un nombre élevé de sous-jonctions comme la cellule triple-jonction InGaP/GaAs/Ge .

Dans cette perspective et puisque le nombre de couches serait très élevé, une piste intéressante serait d'utiliser *l'algorithme génétique* combiné avec la simulation Atlas, permettant ainsi d'effectuer des optimisations itératives de plusieurs paramètres en parallèle. L'opération commence par la génération des vecteurs épaisseur-dopage aléatoires pour ensuite sélectionner des chaînes binaires, appelées chromosomes. Pour chaque chromosome, les facteurs de mérite de la cellule doivent être déterminés en maximisant l'efficacité. Cette méthode a été validée par *S. Michael et al.* sur des cellules MJ [174].

- 3- Il a été démontré que les cellules MJ souffrent d'une sensibilité non négligeable à tout changement du spectre solaire direct (AM1.5D) [174], [175]. Par conséquent, les cellules dupliquées, dont le nombre de sous-jonctions est relativement important, seront impactées par cette problématique surtout dans les régions de moyen et faible DNI. En effet, les sous-jonctions sont connectées en série, donc tout changement du spectre solaire entraîne un désaccord de courant réduisant ainsi le J_{SC} . Il serait donc intéressant de considérer ce paramètre durant l'optimisation pour évaluer son impact sur les propriétés optiques et électriques.

Annexe A. Code de simulation par Silvaco Atlas d'une cellule solaire dupliquée : cas d'une double-jonction de GaAs.

1- Code de simulation pour 2xGaAs

Les commentaires sont en italique

(c) Silvaco Inc., 2017

Structure GaAs/GaAs

Mohamed EL-GAHOUCI, PhD au 3IT

Go Atlas

Pour GaAs

set TAUN_GaAs=10e-9

set TAUP_GaAs=35e-9

set AUGN_GaAs=1e-30

set AUGP_GaAs=1e-30

set COPT_GaAs=2e-10

set affinity_GaAs=4.07

set GaP_GaAs=1.42

set MUN_GaAs=4000

set MUP_GaAs=500

Pour InGaP (x=0.51)

set TAUN_InGaP=0.6e-9

set TAUP_InGaP=3e-9

set AUGN_InGaP=1e-30

set AUGP_InGaP=1e-30

set COPT_InGaP=1e-10

set affinity_InGaP=4.01

set GaP_InGaP=1.89

Pour InAlP (x=0.53)

set TAUN_InAlP=0.1e-9

set TAUP_InAlP=0.1e-9

set AUGN_InAlP=1e-30

set AUGP_InAlP=1e-30

set COPT_InAlP=1e-10

set affinity_InAlP=3.73

```

set      GaP_InAlP=2.36
# Pour AlGaAs (x=0.4)
set      TAUN_AlGaAs=1e-9
set      TAUP_AlGaAs=1e-9
set      AUGN_AlGaAs=1e-30
set      AUGP_AlGaAs=1e-30
set      COPT_AlGaAs=1e-10
set      affinity_AlGaAs=3.63
set      GaP_AlGaAs=1.92
# Facteur de concentration
set      sun_concentration=1
# Dimension
set      xMIN=0
set      xMAX=10

# Température de fonctionnement
set      TEMPER=300
# Épaisseurs
set      t1=0.040 #Window 1
set      t2=0.080 #n junction 1  0.048
set      t3=0.080 #p junction 1  0.048
set      t4=0.040 #BSF 141
set      t5=0.025 #p TJ 1
set      t6=0.025 #n TJ 1
set      t7=0.040 #Window 2
set      t8=0.100 #n junction 2  0.100
set      t9=3.400 #p junction 2  0.500
set      t10=0.100 #BSF 2
set      t11=0.100 #Buffer
# Maillage vertical
set      y0=0.000
set      y1=($y0+$t1)
set      y2=($y1+$t2)
set      y3=($y2+$t3)
set      y4=($y3+$t4)
set      y5=($y4+$t5)
set      y6=($y5+$t6)
set      y7=($y6+$t7)
set      y8=($y7+$t8)
set      y9=($y8+$t9)

```



```

set      y10=($y9+$t10)
set      y11=($y10+$t11)
Mesh auto
#
x.m loc=0.0 s=2.5
x.m loc=10.0 s=2.5
# La zone ou l'effet tunnel est considéré
qtx.m loc=0.0 s=2.5
qtx.m loc=10.0 s=2.5
#
qty.m l=$y5-0.002 s=0.00002
qty.m l=$y5 s=0.0001
qty.m l=$y5+0.002 s=0.00002
#
# LA STRUCTURE : le dopage est uniforme par défaut
region num=1 material=InAlP bot thick=$t1 donors=2e18 ny=10 x.comp=0.53
region num=2 material=GaAs bot thick=$t2 donors=3e18 ny=10
region num=3 material=GaAs bot thick=$t3 accept=8e17 ny=10
region num=4 material=InGaP bot thick=$t4 accept=2e18 ny=10 x.comp=0.51
region num=5 material=AlGaAs bot thick=$t5 accept=5.5e19 ny=100 x.comp=0.4
region num=6 material=InGaP bot thick=$t6 donors=5e19 ny=100 x.comp=0.51
region num=7 material=InGaP bot thick=$t7 donors=2e18 ny=10 x.comp=0.51
region num=8 material=GaAs bot thick=$t8 donors=5e18 ny=10
region num=9 material=GaAs bot thick=$t9 accept=5e17 ny=10
region num=10 material=InGaP bot thick=$t10 accept=5e18 ny=10 x.comp=0.51
region num=11 material=GaAs bot thick=$t11 accept=1e19 ny=10
# Pour définir le dopage Gaussian au niveau des jonctions tunnels
doping F.doping="doping1.c"
doping F.doping="doping2.c"
# Électrode
electrode name=cathode top x.min=0.0 x.max=2.0
electrode name=anode bottom
contact name=cathode con.resistance=5e-4
contact name=anode con.resistance=5e-4
# Effet tunnel
qregion number=1 pts.tunnel=100 pts.normal=5 x1=0 y1=($y5+0.015) x2=10 y2=($y5+0.015)
x3=10 y3=($y5-0.015) x4=0 y4=($y5-0.015)
# Matériaux utilisés

```

```

material mat=GaAs index.file=GaAs.nk affinity=$affinity_GaAs taun0=$TAUN_GaAs
taup0=$TAUP_GaAs EG300=$GaP_GaAs COPT=$COPT_GaAs AUGN=$AUGN_GaAs
AUGP=$AUGP_GaAs MUN=$MUN_GaAs MUP=$MUN_GaAs
material mat=InGaP index.file=InGaP.nk affinity=$affinity_InGaP
taun0=$TAUN_InGaP taup0=$TAUP_InGaP EG300=$GaP_InGaP COPT=$COPT_InGaP
AUGN=$AUGN_InGaP AUGP=$AUGP_InGaP
material mat=AlGaAs sopra=Algaas4.nk affinity=3.63 taun0=1e-9 taup0=1e-9
EG300=1.92 EGALPHA=0 EGBETA=0 COPT=1e-10 AUGN=1e-30 AUGP=1e-30
material mat=InAlP index.file=AlInP.nk affinity=$affinity_InAlP taun0=$TAUN_InAlP
taup0=$TAUP_InAlP EG300=$GaP_InAlP COPT=$COPT_InAlP AUGN=$AUGN_InAlP
AUGP=$AUGP_InAlP
# Matériaux pour anti-reflet : valeur n,k
material mat=SiO2 index.file=SiO2_L101i_abdelatif.nk
material mat=SiN index.file=SiN_L052g_abdelatif.nk
# Modèles physiques utilisés
models analytic temperature=298.15 srh fermi ni.fermi optr BGN auger print bbt.nonlocal
bbt.nlderivs
# Méthode de calcul statistique
method newton itlimit=400 maxtraps=100
#interface THERMIONIC S.S x.min=0 x.max=10 y.min=$y6 y.max=$y7
# Spectre solaire : AM1.5D
# Matrice de transfert : TR.MATRIX
beam num=1 x.origin=($xMAX-$xMIN/2) max.window=($xMAX-$xMIN/2) min.window=-
($xMAX-$xMIN/2) y.origin=-2.0 angle=90.0 front.refl reflect=1 power.file=cellAM15D.spec
out.power=cellGaInP_spectrum.log TR.MATRIX
# Paramètres des couches d'anti-reflet
interface optical ar.material=SiO2 ar.thick=0.090 p1.x=$xMIN p1.y=0.0 p2.x=$xMAX p2.y=0.0
interface optical ar.material=SiN ar.thick=0.040 p1.x=$xMIN p1.y=0.0 p2.x=$xMAX p2.y=0.0
layer=2
# Mobilité selon le modèle de Caughey-Thomas (Analytique)
Mobility mat=GaAs MU1N.CAUG=500 MU1P.CAUG=20 MU2N.CAUG=9400
MU2P.CAUG=491.5 DELTAN.CAUG=0.39 DELTAP.CAUG=0.38 NCRITN.CAUG=3.89e16
NCRITN.CAUG=1.48e17
Mobility mat=InGaP MU1N.CAUG=400 MU1P.CAUG=15 MU2N.CAUG=4300
MU2P.CAUG=150 DELTAN.CAUG=0.7 DELTAP.CAUG=0.8 NCRITN.CAUG=2e16
NCRITN.CAUG=1.5e17
Mobility mat=AlGaAs MU1N.CAUG=500 MU1P.CAUG=5 MU2N.CAUG=2000
MU2P.CAUG=240 DELTAN.CAUG=0.32 DELTAP.CAUG=0.32 NCRITN.CAUG=1e16
NCRITN.CAUG=1e17
# Paramètres de sortie (pour la visualisation)
output band.temp opt.int con.band val.band u.radiative u.srh charge e.velocity h.velocity
e.mobility h.mobility u.auger

```

```

# Voir la structure
save outf=test1.str
tonyplot test1.str

## DARK CURRENT ##
log outf=dark_current.log
solve vanode=0.001
solve vanode=0.01
solve vanode=0.05
solve vanode=0.1
solve name=anode vstep=0.01 vfinal=2.5
tonyplot dark_current.log
# Re-définir les modèles physiques
models analytic temperature=298.15 srh fermi ni.fermi optr BGN auger print bbt.nonlocal
bbt.nlderivs
# Illumination de la cellule solaire, faciliter la convergence
solve bl=$sun_concentration*1e-24
solve bl=$sun_concentration*1e-23
solve bl=$sun_concentration*1e-22
solve bl=$sun_concentration*1e-21
solve bl=$sun_concentration*1e-20
solve bl=$sun_concentration*1e-19
solve bl=$sun_concentration*1e-18
solve bl=$sun_concentration*1e-17
solve bl=$sun_concentration*1e-16
solve bl=$sun_concentration*1e-15
solve bl=$sun_concentration*1e-14
solve bl=$sun_concentration*1e-13
solve bl=$sun_concentration*1e-12
solve bl=$sun_concentration*1e-11
solve bl=$sun_concentration*1e-10
solve bl=$sun_concentration*1e-09
solve bl=$sun_concentration*1e-08
solve bl=$sun_concentration*1e-07
solve bl=$sun_concentration*1e-06
solve bl=$sun_concentration*1e-05
solve bl=$sun_concentration*1e-04
solve bl=$sun_concentration*1e-03
solve bl=$sun_concentration*1e-02
solve bl=$sun_concentration*1e-01

```

```

solve b1=$sun_concentration*1
# Voir la structure après illumination
save outf=illum_str_0_bias.str
tonyplot illum_str_0_bias.str
## PHOTO CURRENT ##
log outf=photo_current.log
solve name=anode vstep=-0.001 vfinal=2.5
solve name=anode vstep=-0.001 vfinal=0
tonyplot photo_current.log
## Figures de mérite ##
extract init infile="photo_current.log"
extract name="current" curve(v."anode", (i."cathode" *(-1))/($xMAX*1E-11))
outf="current_vs_voltage.dat"
extract name="Power" curve(v."anode", (v."anode" * i."cathode" *(-1))) outf="P.dat"
extract name="Jsc" max(curve(v."anode", i."cathode"))
extract name="Jsc(mAcm2)" $Jsc*1e08*1e03/$xMAX
extract name="Voc" x.val from curve(v."anode", i."cathode") where y.val=0.0
extract name="Pm" max(curve(v."anode", (v."anode" * i."cathode")))
extract name="Vm" x.val from curve(v."anode", (v."anode"*i."cathode") ) where y.val="$Pm"
extract name="Im" "$Pm"/"$Vm"
extract name="FF" ("Pm"/("$Jsc"*"$Voc"))*100
extract name="Opt_int" max(beam."1")
extract name="Efficacité" (1e8*$Pm/$Opt_int/$xMAX)*100
QUIT

```

2- Dopage de type Gaussian

Région p⁺⁺ (fichier doping1.c)

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <ctype.h>
#include <malloc.h>
#include <string.h>
#include <template.h>
/*
* Position dependent net doping.
* Arguments:
* x location x (microns)
* y location y (microns)
* *nnet net doping concentration (per cc)

```

```

*/
int doping(double x,double y,double *nnet)
{
double t1=0.040;
double t2=0.025;
double t3=0.025;
double t4=0.040;
double t5=0.040;
double t6=0.025;
double t7=0.025;
double t8=0.040;
double t9=0.025;
double t10=0.025;
double t11=0.040;

double y0=0.000;
double y1=(y0+t1);
double y2=(y1+t2);
double y3=(y2+t3);
double y4=(y3+t4);
double y5=(y4+t5);
double y6=(y5+t6);
double y7=(y6+t7);
double y8=(y7+t8);
double y9=(y8+t9);
double y10=(y9+t10);
double y11=(y10+t11);

double sigma=0.01;
double yc=y5-sigma;

if (y <= yc)
y = 0.;
else
y = yc - y;
*nnet = -1.1e20*exp(-pow(y/sigma,8));
return(0);
}

```

Région n^{++} (fichier doping2.c)

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <ctype.h>
#include <malloc.h>
#include <string.h>
#include <template.h>
/*
 * Position dependent net doping.
 * Arguments:
 * x location x (microns)
 * y location y (microns)
 * *nnet net doping concentration (per cc)
 */
int doping(double x,double y,double *nnet)
{
double t1=0.040;
double t2=0.025;
double t3=0.025;
double t4=0.040;
double t5=0.040;
double t6=0.025;
double t7=0.025;
double t8=0.040;
double t9=0.025;
double t10=0.025;
double t11=0.040;

double y0=0.000;
double y1=(y0+t1);
double y2=(y1+t2);
double y3=(y2+t3);
double y4=(y3+t4);
double y5=(y4+t5);
double y6=(y5+t6);
double y7=(y6+t7);
double y8=(y7+t8);
double y9=(y8+t9);
```

```
double y10=(y9+t10);  
double y11=(y10+t11);  
  
double sigma=0.01;  
double yc=y5+sigma;  
  
if (y > yc)  
y = 0.;  
else  
y = yc - y;  
*nnet = 1e20*exp(-pow(y/sigma,8));  
return(0);  
}
```

Références

- [1] “Global Energy Review 2020,” 2020. doi: 10.1787/a60abbf2-en.
- [2] J. F. Geisz *et al.*, “Six-junction III–V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration,” *Nat. Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 326–335, 2020, doi: 10.1038/s41560-020-0598-5.
- [3] A. Luque and V. Andreiev, “Theoretical Limits of Photovoltaic Conversion,” in *Springer Series in Optical Sciences*, vol. 130, 2007, pp. 132–135.
- [4] “Annual Energy Outlook 2013 with Projections to 2040,” 2013.
- [5] R. R. King and D. Bhusari, “Solar cell generations over 40% efficiency,” *Prog. Photovoltaics*, no. 6, pp. 1114–1129, 2012, doi: 10.1002/pip.1255.
- [6] Conseil Français de l’Énergie, “Les scénarios mondiaux de l’énergie à l’horizon 2050,” Suisse, 2013.
- [7] BP, “BP Statistical Review of World Energy,” 2019. [Online]. Available: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>.
- [8] Conseil génération énergie, “La transition énergétique du Canada,” 2018.
- [9] M. Wiesenfarth, I. Anton, and A. W. Bett, “Challenges in the design of concentrator photovoltaic (CPV) modules to achieve highest efficiencies,” *Appl. Phys. Rev.*, vol. 5, no. 4, 2018, doi: 10.1063/1.5046752.
- [10] K. K. Chong, S. L. Lau, T. K. Yew, and P. C. L. Tan, “Design and development in optics of concentrator photovoltaic system,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 598–612, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.005.
- [11] S. Skouri, A. Ben Haj Ali, S. Bouadila, M. Ben Salah, and S. Ben Nasrallah, “Design and construction of sun tracking systems for solar parabolic concentrator displacement,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 1419–1429, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.03.006.
- [12] 3IT, “Parc solaire, le plus grand au Canada,” 2018. <https://www.usherbrooke.ca/recherche/udes/caractere-distinctif/infrastructures-uniques/parc-solaire/>.
- [13] A. Vossier, D. Chemisana, G. Flamant, and A. Dollet, “Very high fluxes for concentrating photovoltaics: Considerations from simple experiments and modeling,” *Renew. Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 31–39, 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.06.036.
- [14] E. F. Fernández, N. Seoane, F. Almonacid, and A. J. García-loureiro, “Vertical-Tunnel-Junction (VTJ) Solar Cell for Ultra-High Light Concentrations (>2000 Suns),” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 40, no. 1, pp. 44–47, 2019.
- [15] B. Paquette, A. Boucherif, V. Aimez, and R. Arès, “Novel multijunction solar cell design for low cost, high concentration systems,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, no. July 2015, pp. 150–158, 2016, doi: 10.1002/pip.
- [16] D. A. W. B. Maïke Wiesenfarth, Dr. Simon P. Philipps, “Fraunhofer ISE and NREL. “Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology” Version 1.3, April 2017,” 2017.
- [17] I. R.-S. and C. A. M. Ochoa, E. Barrigón, L. Barrutia, I. García, “Limiting factors on the semiconductor structure of III–V multijunction solar cells for ultra-high concentration

- (1000–5000 suns),” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, no. 2, pp. 1332–1345, 2016, doi: 10.1002/pip.2791.
- [18] P. Huo and I. R. Stolle, “Enhanced performance of GaInP / GaAs / Ge solar cells under high concentration through Pd / Ge / Ti / Pd / Al grid metallization,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, no. August 2018, pp. 789–797, 2019, doi: 10.1002/pip.3149.
- [19] C. Algorta and V. Díaz, “Influence of series resistance on guidelines for manufacture of concentrator p-on-n GaAs solar cells,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 8, no. 2, pp. 211–225, 2000, doi: 10.1002/(SICI)1099-159X(200003/04)8:2<211::AID-PIP291>3.0.CO;2-D.
- [20] M. T. Hörantner *et al.*, “The Potential of Multijunction Perovskite Solar Cells,” *ACS Energy Lett.*, vol. 2, no. 10, pp. 2506–2513, 2017, doi: 10.1021/acsenergylett.7b00647.
- [21] J. Benick *et al.*, “III–V-on-silicon solar cells reaching 33% photoconversion efficiency in two-terminal configuration,” *Nat. Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 326–333, 2018, doi: 10.1038/s41560-018-0125-0.
- [22] X. Zhang *et al.*, “Structural characterization of integrated II–VI and III–V heterostructures for solar cell applications,” *J. Electron. Mater.*, vol. 38, no. 8, pp. 1558–1562, 2009, doi: 10.1007/s11664-009-0746-y.
- [23] J. Scott Ward *et al.*, “Techno-economic analysis of three different substrate removal and reuse strategies for III–V solar cells,” *Prog. Photovolt Res. Appl.*, vol. 24, pp. 1284–1292, 2016, doi: 10.1002/pip.2776.
- [24] E. Veinberg-Vidal *et al.*, “Manufacturing and Characterization of III–V on Silicon Multijunction Solar Cells,” *Energy Procedia*, vol. 92, pp. 242–247, 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.07.066.
- [25] G. Létay and A. W. Bett, “EtaOpt – a program for calculating limiting efficiency and optimum bandgap structure for multi-bandgap solar cells and TPV cells,” *17th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf.*, 2001.
- [26] W. W. Anderson and Y. G. Chai, “Becquerel effect solar cell,” *Energy Convers.*, vol. 15, no. 3–4, pp. 85–94, 1976, doi: 10.1016/0013-7480(76)90020-6.
- [27] L. C. Hirst and N. J. Ekins-Daukes, “Fundamental losses in solar cells,” *Prog. Photovoltaics*, vol. 19, pp. 286–293, 2011, doi: 10.1002/pip.1024.
- [28] M. A. Green, “Radiative efficiency of state-of-the-art photovoltaic cells,” *Prog. Photovoltaics*, vol. 20, pp. 472–476, 2011, doi: 10.1002/pip.1147.
- [29] NREL, “Best research-cell efficiencies.” <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20200406.pdf>.
- [30] M. Y. | A. W. Y. H. Green, Martin A. Ewan D. Dunlop Dean H. Levi Jochen Hohl-Ebinger, “Solar cell efficiency tables (version 54),” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 27, no. 1, pp. 3–12, 2019, doi: 10.1002/pip.3102.
- [31] S. O. Kasap and R. K. Sinha, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*. PEARSON, 2013.
- [32] A. S. Brown and M. A. Green, “Detailed balance limit for the series constrained two terminal tandem solar cell,” *Phys. E*, vol. 14, pp. 1–5, 2002, [Online]. Available: papers2://publication/uuid/A979552C-0DF1-484E-9DF9-B7138A7117B0.
- [33] J. F. Geisz, A. X. Levander, A. G. Norman, K. M. Jones, and M. J. Romero, “In situ stress measurement for MOVPE growth of high efficiency lattice-mismatched solar cells,” *J.*

- Cryst. Growth*, vol. 310, no. 7–9, pp. 2339–2344, 2008, doi: 10.1016/j.jcrysgro.2007.11.048.
- [34] F. Dimroth *et al.*, “Four-Junction Wafer-Bonded Concentrator Solar Cells,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 6, no. 1, pp. 343–349, 2016.
- [35] J. F. Geisz *et al.*, “Building a Six-Junction Inverted Metamorphic Concentrator Solar Cell,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 8, no. 2, pp. 626–632, 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2778567.
- [36] S. P. Philipps and A. W. Bett, “III-V Multi-junction solar cells and concentrating photovoltaic (CPV) systems,” *Adv. Opt. Technol.*, vol. 3, no. 5–6, pp. 469–478, 2014, doi: 10.1515/aot-2014-0051.
- [37] K. A. W. Horowitz, M. Woodhouse, H. Lee, and G. P. Smestad, “A bottom-up cost analysis of a high concentration PV module,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1679, no. September 2015, 2015, doi: 10.1063/1.4931548.
- [38] K. V. and P. B. J. Scott Ward, Timothy Remo, Kelsey Horowitz, Michael Woodhouse, Bhushan Sopori, “Techno-economic analysis of three different substrate removal and reuse strategies for III-V solar cells,” *Prog. Photovolt Res. Appl.*, vol. 10, no. May, pp. 1284–1292, 2016, doi: 10.1002/pip.
- [39] R. Cariou *et al.*, “Low temperature plasma enhanced CVD epitaxial growth of silicon on GaAs: A new paradigm for III-V/Si integration,” *Nature*, vol. 6, no. January, pp. 1–8, 2016, doi: 10.1038/srep25674.
- [40] K. Nishioka, T. Takamoto, T. Agui, M. Kaneiwa, Y. Uraoka, and T. Fuyuki, “Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell and optimization of solar cell’s structure focusing on series resistance for high-efficiency concentrator photovoltaic systems,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 90, no. 9, pp. 1308–1321, 2006, doi: 10.1016/j.solmat.2005.08.003.
- [41] L. C. Hirst and N. J. E.-D. Department, “Fundamental losses in solar cells,” *Ieee Trans Fuzzy Syst*, vol. 20, no. 6, pp. 1114–1129, 2012, doi: 10.1002/pip.
- [42] A. Shang and X. Li, “Photovoltaic Devices: Opto-Electro-Thermal Physics and Modeling,” *Adv. Mater.*, vol. 29, no. 8, pp. 1–8, 2017, doi: 10.1002/adma.201603492.
- [43] J. L. Gray, “The Physics of the Solar Cell,” in *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, A. Luque and S. Hegedus, Eds. John Wiley & Sons, 2011, pp. 82–129.
- [44] C. Algora and V. Diaz, “Influence of Series Resistance on Guidelines for Manufacture of Concentrator p-on-n GaAs Solar Cells,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, no. August 1999, pp. 211–225, 2000.
- [45] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Wiley, 2003.
- [46] A. W. Walker, O. Thériault, M. M. Wilkins, J. F. Wheeldon, and K. Hinzer, “Tunnel-junction-limited multijunction solar cell performance over concentration,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 19, no. 5, 2013, doi: 10.1109/JSTQE.2013.2258140.
- [47] C. Algora *et al.*, “A GaAs solar cell with an efficiency of 26.2% at 1000 suns and 25.0% at 2000 suns,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 48, no. 5, pp. 840–844, 2001, doi: 10.1109/16.918225.
- [48] A. Ben Or and J. Appelbaum, “Dependence of multi-junction solar cells parameters on concentration and temperature,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 130, pp. 234–240, 2014,

doi: 10.1016/j.solmat.2014.07.010.

- [49] J. R. Wilcox and J. L. Gray, “A distributed emitter model for solar cells: Extracting a temperature dependent lumped series resistance,” *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 2122–2127, 2012, doi: 10.1109/PVSC.2012.6318016.
- [50] H. Cotal *et al.*, “III – V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 2, pp. 174–192, 2009, doi: 10.1039/b809257e.
- [51] M. Saadah, E. Hernandez, and A. A. Balandin, “Thermal management of concentrated multi-junction solar cells with graphene-enhanced thermal interface materials,” *Appl. Sci.*, vol. 7, no. 6, 2017, doi: 10.3390/app7060589.
- [52] M. A. Green, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, and A. W. Y. Ho-Baillie, “Solar cell efficiency tables (version 54),” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 27, no. 7, pp. 565–575, 2019, doi: 10.1002/pip.3171.
- [53] J. F. Geisz *et al.*, “Building a Six-Junction Inverted Metamorphic Concentrator Solar Cell,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 8, no. 2, pp. 626–632, 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2778567.
- [54] J. F. Geisz *et al.*, “Building a Six-Junction Inverted Metamorphic Concentrator Solar Cell,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 8, no. 2, pp. 626–632, 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2778567.
- [55] R. M. France *et al.*, “Design Flexibility of Ultrahigh Efficiency Four-Junction Inverted Metamorphic Solar Cells,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 6, no. 2, pp. 578–583, 2016, doi: 10.1109/JPHOTOV.2015.2505182.
- [56] K. Shanks, S. Senthilarasu, and T. K. Mallick, “Optics for concentrating photovoltaics: Trends, limits and opportunities for materials and design,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 394–407, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.089.
- [57] N. Braslau, J. B. Gunn, and J. L. Staples, “Metal-semiconductor contacts for GaAs bulk effect devices,” *Solid State Electron.*, vol. 10, no. 5, pp. 381–383, 1967, doi: 10.1016/0038-1101(67)90037-8.
- [58] T. S. Kuan, P. E. Batson, T. N. Jackson, H. Rupprecht, and E. L. Wilkie, “Electron microscope studies of an alloyed Au/Ni/Au-Ge ohmic contact to GaAs,” *J. Appl. Phys.*, vol. 54, no. 12, pp. 6952–6957, 1983, doi: 10.1063/1.332011.
- [59] P. Huo and I. Rey-Stolle, “Ti/Pd/Ag Contacts to n-Type GaAs for High Current Density Devices,” *J. Electron. Mater.*, vol. 45, no. 6, pp. 2769–2775, 2016, doi: 10.1007/s11664-016-4432-6.
- [60] P. Huo, B. Galiana, and I. Rey-Stolle, “Comparison of Ti/Pd/Ag, Pd/Ti/Pd/Ag and Pd/Ge/Ti/Pd/Ag contacts to n-type GaAs for electronic devices handling high current densities,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 4, 2017, doi: 10.1088/1361-6641/32/4/045006.
- [61] J. F. Wheeldon *et al.*, “Performance comparison of AlGaAs, GaAs and InGaP tunnel junctions for concentrated multijunction solar cells,” *Prog. Photovolt Res. Appl.*, vol. 19, pp. 442–452, 2010, doi: 10.1002/pip.1056.
- [62] D. Masson and S. Fafard, “Solar cell with split gridline pattern,” 20110277835, 2011.
- [63] G. M. M. W. Bissels, M. A. H. Asselbergs, J. J. Schermer, E. J. Haverkamp, N. J. Smeenk, and E. Vlieg, “A genuine circular contact grid pattern for solar cells,” *Prog. Photovolt Res. Appl.*, vol. 18, pp. 517–526, 2011, doi: 10.1002/pip.1076.

- [64] H. Cotal *et al.*, “III-V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 174–192, 2009, doi: 10.1039/b809257e.
- [65] I. García, I. Rey-Stolle, and C. Algora, “Performance analysis of AlGaAs/GaAs tunnel junctions for ultra-high concentration photovoltaics,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 4, 2012, doi: 10.1088/0022-3727/45/4/045101.
- [66] M. Hermle, G. Létay, S. P. Philipps, and A. W. Bett, “Numerical Simulation of Tunnel Diodes for Multi-junction Solar Cells,” *Prog. Photovolt Res. Appl.*, vol. 16, pp. 409–418, 2008, doi: 10.1002/pip.824.
- [67] U. Aeberhard, “Rigorous simulation of InAlGaAs-InGaAs bulk and quantum well interband tunnel junctions for multi-junction solar cells,” *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, no. 5, pp. 154–157, 2013, doi: 10.1109/PVSC.2013.6744118.
- [68] M. P. Lumb *et al.*, “Double quantum-well tunnel junctions with high peak tunnel currents and low absorption for InP multi-junction solar cells,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, no. 21, 2012, doi: 10.1063/1.4722890.
- [69] Z. Liu *et al.*, “Impurity resonant states p-type doping in wide-band-gap nitrides,” *Sci. Rep.*, vol. 6, no. January, pp. 1–8, 2016, doi: 10.1038/srep19537.
- [70] C. Algora and V. Diaz, “Influence of Series Resistance on Guidelines for Manufacture of Concentrator p-on-n GaAs Solar Cells,” *Prog. Photovoltaics*, vol. 8, no. August 1999, pp. 211–225, 2000.
- [71] A. Vossier, B. Hirsch, E. A. Katz, and J. M. Gordon, “On the ultra-miniaturization of concentrator solar cells,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 4, pp. 1188–1192, 2011, doi: 10.1016/j.solmat.2010.12.053.
- [72] Á. Valera, E. F. Fernández, P. M. Rodrigo, J. P. Ferrer-Rodriguez, P. Pérez-Higueras, and F. Almonacid, “Finite element analysis of cooling mechanism by flat heat-sinks in ultra-high CPV systems,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2149, no. August, 2019, doi: 10.1063/1.5124176.
- [73] S. Fafard *et al.*, “Ultra-efficient N-junction photovoltaic cells with $V_{oc} > 14V$ at high optical input powers,” *44th Photovolt. Spec. Conf. PVSC 2017*, pp. 1–5, 2017, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366546.
- [74] S. Fafard *et al.*, “Ultrahigh efficiencies in vertical epitaxial heterostructure architectures Ultrahigh efficiencies in vertical epitaxial heterostructure architectures,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 071101, 2016, doi: 10.1063/1.4941240.
- [75] D. Masson, F. Proulx, and S. Fafard, “Pushing the limits of concentrated photovoltaic solar cell tunnel junctions in novel high-efficiency GaAs phototransducers based on a vertical epitaxial heterostructure architecture,” *Prog. Photovolt Res. Appl.*, no. October, pp. 1687–1696, 2015, doi: 10.1002/pip.
- [76] M. C. A. York and S. Fafard, “High efficiency phototransducers based on a novel vertical epitaxial heterostructure architecture (VEHSA) with thin p/n junctions,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 17, 2017, doi: 10.1088/1361-6463/aa60a6.
- [77] M. C. A. York, A. Mailhot, A. Boucherif, R. Arès, V. Aimez, and S. Fafard, “Challenges and strategies for implementing the vertical epitaxial heterostructure architecture (VEHSA) design for concentrated photovoltaic applications,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 181, no. August 2017, pp. 46–52, 2018, doi: 10.1016/j.solmat.2017.11.034.
- [78] F. Dimroth *et al.*, “Waferbonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency,” *Prog. Photovoltaics*, vol. 22, pp. 277–282,

- 2014, doi: 10.1002/pip.
- [79] S. V Boriskina, M. A. Green, and K. Catchpole, “High efficiency phototransducers based on a novel vertical epitaxial heterostructure architecture (VEHSA) with thin p / n junctions,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 50, 2017.
 - [80] Y. Cui *et al.*, “Boosting Solar Cell Photovoltage via Nanophotonic Engineering,” *Nano Lett.*, vol. 16, no. 10, pp. 6467–6471, 2016, doi: 10.1021/acs.nanolett.6b02971.
 - [81] F. Dimroth *et al.*, “Four-junction wafer-bonded concentrator solar cells,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 6, no. 1, pp. 343–349, 2016, doi: 10.1109/JPHOTOV.2015.2501729.
 - [82] M. A. Green *et al.*, “Solar cell efficiency tables (Version 53),” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 27, no. 1, pp. 3–12, 2019, doi: 10.1002/pip.3102.
 - [83] A. Boucherif, G. Beaudin, V. Aimez, and R. Arès, “Mesoporous germanium morphology transformation for lift-off process and substrate re-use,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 102, no. January, 2013, doi: 10.1063/1.4775357.
 - [84] Richard M. Swanson, “The promise of concentrators,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 8, no. 1, pp. 93–111, 2000.
 - [85] J. Hashimoto, S. Kurtz, K. Sakurai, M. Muller, and K. Otani, “Field experience and performance of CPV system in different climates,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1556, no. September 2013, pp. 261–265, 2013, doi: 10.1063/1.4822245.
 - [86] D. J. Coyle *et al.*, “Maximization of conversion efficiency based on global normal irradiance using hybrid concentrator photovoltaic architecture,” *Prog. Photovoltaics*, no. October 2011, pp. 156–172, 2013, doi: 10.1002/pip.
 - [87] T. Takamoto, H. Washio, and H. Juso, “Application of InGaP/GaAs/InGaAs triple junction solar cells to space use and concentrator photovoltaic,” *IEEE 40th Photovolt. Spec. Conf. PVSC 2014*, pp. 1–5, 2014, doi: 10.1109/PVSC.2014.6924936.
 - [88] Y. Zhangbo, L. Qifen, Z. Qunzhi, and P. Weiguo, “The cooling Technology of Solar Cells under Concentrated system,” *IEEE 6th Int. Power Electron. Motion Control Conf.*, vol. 3, pp. 2193–2197, 2009, doi: 10.1109/IPEMC.2009.5157766.
 - [89] M. Saadah, E. Hernandez, and A. A. Balandin, “Thermal Management of Concentrated Multi- Junction Solar Cells with Graphene-Enhanced Thermal Interface Materials,” *Appl. Sci.*, pp. 1–13, 2017, doi: 10.3390/app7060589.
 - [90] K. Shanks, J. P. Ferrer-rodriguez, E. F. Fernández, and F. Almonacid, “A > 3000 suns high concentrator photovoltaic design based on multiple Fresnel lens primaries focusing to one central solar cell,” *Sol. Energy*, vol. 169, no. May, pp. 457–467, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.05.016.
 - [91] J. P. Ferrer-Rodríguez, E. F. Fernández, F. Almonacid, and P. Pérez-Higueras, “Optical design of a 4-off-axis-unit Cassegrain ultra-high concentrator photovoltaics module with a central receiver,” *Opt. Lett.*, vol. 41, no. 9, pp. 3–6, 2016.
 - [92] S. Charan, M. Konagai, and K. Takahashi, “Series resistance effects in (GaAl)As/GaAs concentrator solar cells,” *J. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 2, pp. 963–968, 1979, doi: 10.1063/1.325992.
 - [93] D. K. S. D. L.Meier, “Solar Cell Contact Resistance-A Review,” *IEEE Trans. Electron Devices*, no. 5, 1984.
 - [94] A. Vossier, B. Hirsch, E. A. Katz, and J. M. Gordon, “On the ultra-miniaturization of concentrator solar cells,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 4, pp. 1188–1192, 2011,

doi: 10.1016/j.solmat.2010.12.053.

- [95] M. Alves, A. Pérez-rodríguez, P. J. Dale, C. Domínguez, and S. Sadewasser, “Thin-film micro-concentrator solar cells,” *JPhys Energy*, 2020.
- [96] E. Barrigón, I. García, L. Barrutia, I. Rey-Stolle, and C. Algora, “Highly conductive p++-AlGaAs/n++-GaInP tunnel junctions for ultra-high concentrator solar cells,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 22, no. 6, pp. 399–404, 2014, doi: 10.1002/pip.
- [97] J. A. Phys and A. Luque, “Will we exceed 50 % efficiency in photovoltaics?,” *J. Appl. Phys.*, vol. 031301, no. August 2011, 2015, doi: 10.1063/1.3600702.
- [98] F. T. Si, O. Isabella, and M. Zeman, “Too Many Junctions ? A Case Study of Multijunction Thin-Film Silicon Solar Cells,” *Adv. Sustain. Syst.*, vol. 1700077, 2017, doi: 10.1002/adsu.201700077.
- [99] M. Baudrit and C. Algora, “Theoretical optimization of GaInP/GaAs dual-junction solar cell: Toward a 36% efficiency at 1000 suns,” *Phys. Status Solidi*, vol. 478, no. 2, pp. 474–478, 2010, doi: 10.1002/pssa.200925210.
- [100] V. Sabnis, H. Yuen, and M. Wiemer, “High-efficiency multijunction solar cells employing dilute nitrides,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1477, no. October, pp. 14–19, 2012, doi: 10.1063/1.4753823.
- [101] J. F. Geisz *et al.*, “Pathway to 50% efficient inverted metamorphic concentrator solar cells,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1881, no. September 2017, pp. 1–7, 2017, doi: 10.1063/1.5001425.
- [102] K. Ghosal *et al.*, “Semprius field results and progress in system development,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, no. 2, pp. 703–708, 2014, doi: 10.1109/JPHOTOV.2013.2288026.
- [103] D. J. Friedman and S. R. Kurtz, “Breakeven criteria for the GaInNAs junction in GaInP/GaAs/GaInNAs/Ge four-junction solar cells,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 10, no. 5, pp. 331–344, 2002, doi: 10.1002/pip.430.
- [104] S. R. Kurtz, D. Myers, and J. M. Olson, “Projected performance of three- and four-junction devices using GaAs and GaInP,” *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 875–878, 1997, doi: 10.1109/PVSC.1997.654226.
- [105] Y. Cui *et al.*, “Boosting Solar Cell Photovoltage via Nanophotonic Engineering,” *Nano Lett.*, no. 1, pp. 6–10, 2016, doi: 10.1021/acs.nanolett.6b02971.
- [106] D. C. Law *et al.*, “Future technology pathways of terrestrial III-V multijunction solar cells for concentrator photovoltaic systems,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, no. 10, pp. 1314–1318, 2008, doi: 10.1016/j.solmat.2008.07.014.
- [107] A. Vossier, F. Gualdi, A. Dollet, R. Ares, and V. Aimez, “Approaching the Shockley-Queisser limit: General assessment of the main limiting mechanisms in photovoltaic cells,” *J. Appl. Phys.*, vol. 117, 2015, doi: 10.1063/1.4905277.
- [108] Y. J. Lee, D. S. Ruby, D. W. Peters, B. B. McKenzie, and J. W. P. Hsu, “ZnO nanostructures as efficient antireflection layers in solar cells,” *Nano Lett.*, vol. 8, no. 5, pp. 1501–1505, 2008, doi: 10.1021/nl080659j.
- [109] N. Sahouane and A. Zerga, “Optimization of antireflection multilayer for industrial crystalline silicon solar cells,” *Energy Procedia*, vol. 44, pp. 118–125, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2013.12.017.
- [110] S. Čičić and S. Tomić, “Genetic algorithm designed high efficiency laser power converters based on the vertical epitaxial heterostructure architecture,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 200, no. December 2018, 2019, doi: 10.1016/j.solmat.2019.03.050.

- [111] M. Schubert, V. Gottschalch, C. M. Herzinger, H. Yao, P. G. Snyder, and J. A. Woollam, "Optical constants of Ga x In 1– x P lattice matched to GaAs," *J. Appl. Phys.*, vol. 77, no. 4, pp. 3416–3419, 1995, doi: 10.1063/1.358632.
- [112] F. Dimroth, C. Baur, A. W. Bett, W. Köstler, M. Meusel, and G. Strobl, "Thin 5-junction solar cells with improved radiation hardness," *Conf. Rec. IEEE 4th World Conf. Photovolt. Energy Conversion, WCPEC-4*, vol. 2, pp. 1777–1780, 2006, doi: 10.1109/WCPEC.2006.279835.
- [113] F. J. Schultes *et al.*, "Temperature dependence of diffusion length, lifetime and minority electron mobility in GaInP," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 103, no. 24, 2013, doi: 10.1063/1.4847635.
- [114] S. A. Mintairov *et al.*, "Study of Minority Carrier Diffusion Lengths in Photoactive Layers of Multijunction Solar Cells," *Phys. Semicond. Devices*, vol. 44, no. 8, pp. 1118–1123, 2010, doi: 10.1134/S1063782610080233.
- [115] K. P. O'Donnell and X. Chen, "Temperature dependence of semiconductor band gaps," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 58, no. 25, pp. 2924–2926, 1991, doi: 10.1063/1.104723.
- [116] A. W. Walker, H. Oliver, D. N. Micha, B. Bl, A. W. Bett, and F. Dimroth, "Impact of Photon Recycling on GaAs Solar Cell Designs," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 5, no. 6, pp. 1636–1645, 2015, doi: 10.1109/JPHOTOV.2015.2479463.
- [117] F. Proulx *et al.*, "Measurement of strong photon recycling in ultra-thin GaAs n/p junctions monolithically integrated in high-photovoltage vertical epitaxial heterostructure architectures with conversion efficiencies exceeding 60%," *Phys. Status Solidi - Rapid Res. Lett.*, vol. 11, no. 2, 2016, doi: 10.1002/pssr.201600385.
- [118] F. J. Vorster and E. E. Van Dyk, "Current-voltage characteristics of high-concentration, photovoltaic arrays," *Prog. Photovolt Res. Appl.*, vol. 13, no. 1, pp. 55–66, 2005, doi: 10.1002/pip.563.
- [119] R. R. King *et al.*, "Fundamental Efficiency Losses in Next-Generation Multijunction Solar Cells," *25th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Val. Spain, Sep. 6-10, 2010*, pp. 1–4, 2010.
- [120] "See Research Cell Efficiency Records 'https://www.energy.gov/eere/solar/downloads/research-cell-efficiency-records.'"
- [121] E. E. Perl, W. E. McMahon, J. E. Bowers, and D. J. Friedman, "Design of antireflective nanostructures and optical coatings for next-generation multijunction photovoltaic devices," *Opt. Express*, vol. 22, no. S5, p. A1243, 2014, doi: 10.1364/oe.22.0a1243.
- [122] M. H. Tsutagawa and S. Michael, "Triple junction InGaP/GaAs/Ge solar cell optimization: The design parameters for a 36.2% efficient space cell using Silvaco ATLAS modeling & simulation," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 001954–001957, 2009, doi: 10.1109/PVSC.2009.5411544.
- [123] A. Marti and G. L. Arafijo, "Limiting efficiencies for photovoltaic energy conversion in multigap systems," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 43, pp. 203–222, 1996, [Online]. Available: https://ac.els-cdn.com/0927024896000153/1-s2.0-0927024896000153-main.pdf?_tid=d01de931-8325-477b-96b3-287c5dc79da&acdnat=1543402352_cb9e9f904bff5b731f01990df2a0515b.
- [124] and P. U. Lewis Fraas, Leonid Minkin, James Avery, H. X. Huang, Jany Fraas, "Portable concentrating solar power supplies," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, no. May 2014, 2010, doi: 10.1109/PVSC.2010.5614063.

- [125] I. García, I. Rey-Stolle, B. Galiana, and C. Algora, “A 32.6% efficient lattice-matched dual-junction solar cell working at 1000 suns,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, no. 5, pp. 1–4, 2009, doi: 10.1063/1.3078817.
- [126] N. Yamada and D. Hirai, “Maximization of conversion efficiency based on global normal irradiance using hybrid concentrator photovoltaic architecture,” *Prog. Photovolt Res. Appl.*, vol. 24, pp. 846–854, 2016, doi: 10.1002/pip.2765.
- [127] Richard Stevenson, “Switching to a silicon foundation and re-using germanium substrates offer two options for driving down the cost of multi-junction cells,” *Compound semiconductors magazine*, vol. 26, no. 3, pp. 28–31, 2020.
- [128] L. Barrutia *et al.*, “Development of the lattice matched GaInP / GaInAs / Ge triple junction solar cell with an efficiency over 40 %,” *IEEE*, pp. 1–4, 2018.
- [129] S. Fafard *et al.*, “Ultrahigh efficiencies in vertical epitaxial heterostructure architectures,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 108, no. 7, 2016, doi: 10.1063/1.4941240.
- [130] S. Fafard *et al.*, “High-photovoltage GaAs vertical epitaxial monolithic heterostructures with 20 thin p/n junctions and a conversion efficiency of 60%,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 109, no. 13, 2016, doi: 10.1063/1.4964120.
- [131] M. El-Gahouchi, M. R. Azizian, R. Arès, S. Fafard, and A. Boucherif, “Cost-effective energy harvesting at ultra-high concentration with duplicated concentrated photovoltaic solar cells,” *Energy Sci. Eng.*, no. January, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1002/ese3.692.
- [132] K. J. Singh and S. K. Sarkar, “Highly efficient ARC less InGaP/GaAs DJ solar cell numerical modeling using optimized InAlGaP BSF layers,” *Opt. Quantum Electron.*, vol. 43, no. 1–5, pp. 1–21, 2012, doi: 10.1007/s11082-011-9499-y.
- [133] M. Ghannam, Y. Abdurraheem, and G. Shehada, “Interpretation of the degradation of silicon HIT solar cells due to inadequate front contact TCO work function,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 145, pp. 423–431, 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2015.11.007.
- [134] C. Algora *et al.*, “A GaAs solar cell with an efficiency of 26.2% at 1000 suns and 25.0% at 2000 suns,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 48, no. 5, pp. 840–844, 2001, doi: 10.1109/16.918225.
- [135] D. S. Silvaco Software, *Atlas User’s Manual*, no. 408. 2016.
- [136] S. Adachi, *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors*. 2009.
- [137] C. Aliani, M. Krichen, and A. Zouari, “Effect of the front - metal work function on the performance of a - Si : H (n +) / a - Si : H (i) / c - Si (p) heterojunction solar cells,” *J. Comput. Electron.*, vol. 18, no. 2, pp. 576–583, 2019, doi: 10.1007/s10825-019-01324-4.
- [138] A. Vossier, B. Hirsch, and J. M. Gordon, “Is Auger recombination the ultimate performance limiter in concentrator solar cells?,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 19, pp. 1–4, 2010, doi: 10.1063/1.3510474.
- [139] E. F. Fernández, J. Montes-Romero, J. de la Casa, P. Rodrigo, and F. Almonacid, “Comparative study of methods for the extraction of concentrator photovoltaic module parameters,” *Sol. Energy*, vol. 137, pp. 413–423, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.08.046.
- [140] Y. Xu, T. Gong, and J. N. Munday, “The generalized Shockley-Queisser limit for nanostructured solar cells,” *Nature*, pp. 1–9, 2015, doi: 10.1038/srep13536.
- [141] A. W. Bett, F. Dimroth, G. Stollwerck, and O. V. Sulima, “III-V compounds for solar cell applications,” *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 69, no. 2, pp. 119–129, 1999, doi:

10.1007/s003390050983.

- [142] Silvaco Inc., *Atlas User's Manual*, no. 408. 2016.
- [143] J. Singh, "BOLTZMANN TRANSPORT THEORY," in *Modern Physics for Engineers*, 2004, pp. 353–363.
- [144] J. L. Gray, "The Physics of the Solar Cell," in *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2003, pp. 61–129.
- [145] D. Caughey and R. Thomas, "Carrier Mobilities in Silicon Empirically Related to Doping and Field," *IEEE*, vol. 87, no. September, pp. 835–842, 1952.
- [146] M. Sotoodeh, A. H. Khalid, and A. A. Rezazadeh, "Empirical low-field mobility model for III-V compounds applicable in device simulation codes," *J. Appl. Phys.*, vol. 87, no. 6, pp. 2890–2900, 2000, doi: 10.1063/1.372274.
- [147] S. Čičić and S. Tomić, "Genetic algorithm designed high efficiency laser power converters based on the vertical epitaxial heterostructure architecture," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 200, no. May, 2019, doi: 10.1016/j.solmat.2019.03.050.
- [148] M. Baudrit and C. Algora, "Tunnel diode modeling, including nonlocal trap-assisted tunneling: A focus on III-V multijunction solar cell simulation," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 57, no. 10, pp. 2564–2571, 2010, doi: 10.1109/TED.2010.2061771.
- [149] E. O. Kane, "Theory of tunneling magnetoresistance," *J. Appl. Phys.*, vol. 32, no. 4–5, pp. 83–91, 1961, doi: 10.1080/0141159021000051316.
- [150] K. Yang, J. R. East, and G. I. Haddad, "Numerical modeling of abrupt heterojunctions using a thermionic-field emission boundary condition," *Solid State Electron.*, vol. 36, no. 3, pp. 321–330, 1993, doi: 10.1016/0038-1101(93)90083-3.
- [151] C. R. Crowell, "The Richardson constant for thermionic emission in Schottky barrier diodes," *Solid State Electron.*, vol. 8, no. 4, pp. 395–399, 1965, doi: 10.1016/0038-1101(65)90116-4.
- [152] P. Colter, B. Hagar, and S. Bedair, "Tunnel Junctions for III-V Multijunction Solar Cells Review," *Crystals*, vol. 8, no. 12, p. 445, 2018, doi: 10.3390/cryst8120445.
- [153] M. Baudrit, C. Algora, I. Rey-Stolle, I. García, and B. Galiana, "Numerical analysis of GaInP solar cells: Toward advanced photovoltaic devices modeling," *NUSOD '05 - Proc. 5th Int. Conf. Numer. Simul. Optoelectron. Devices*, vol. 2005, pp. 41–42, 2005, doi: 10.1109/NUSOD.2005.1518125.
- [154] P. S. Klemmer, Y. A. Mityagin, M. P. Telenkov, K. K. Nagaraja, D. A. Elantsev, and S. Amiri, "Resonant tunneling in GaAs/AlGaAs quantum well system for solar photovoltaics," *Superlattices Microstruct.*, vol. 140, no. February, p. 106472, 2020, doi: 10.1016/j.spmi.2020.106472.
- [155] Y. Zhang *et al.*, "Design and demonstration of ultra-wide bandgap AlGaN tunnel junctions," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 109, no. 12, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1063/1.4962900.
- [156] T. Gaas, B. Paquette, B. Ilahi, V. Aimez, and R. Arès, "Inhibition of Te surfactant effect on surface morphology of heavily," *J. Cryst. Growth*, vol. 383, pp. 30–35, 2013, doi: 10.1016/j.jcrysgro.2013.08.015.
- [157] J. Batey and S. L. Wright, "Energy band alignment in GaAs:(Al,Ga)As heterostructures: The dependence on alloy composition," *J. Appl. Phys.*, vol. 59, no. 1, pp. 200–209, 1986, doi: 10.1063/1.336864.
- [158] K. A. Bertness, S. R. Kurtz, D. J. Friedman, A. E. Kibbler, C. Kramer, and J. M. Olson,

- “29.5%-efficient GaInP/GaAs tandem solar cells,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, no. 8, pp. 989–991, 1994, doi: 10.1063/1.112171.
- [159] M. Li, H. Shen, L. Zhuang, D. Chen, and X. Liang, “SiO₂ antireflection coatings fabricated by electron-beam evaporation for black monocrystalline silicon solar cells,” *Int. J. Photoenergy*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/670438.
- [160] D. N. Wright, E. S. Marstein, and A. Holt, “Double layer anti-reflective coatings for silicon solar cells,” *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, no. 2027, pp. 1237–1240, 2005, doi: 10.1109/pvsc.2005.1488363.
- [161] G. B. Lush *et al.*, “A study of minority carrier lifetime versus doping concentration in n-type GaAs grown by metalorganic chemical vapor deposition,” *J. Appl. Phys.*, vol. 72, no. 4, pp. 1436–1442, 1992, doi: 10.1063/1.351704.
- [162] A. You, M. A. Y. Be, and I. In, “Photoacoustic determination of the recombination velocity at the AlGaAs / GaAs heterostructure interface,” *J. Appl. Phys.*, vol. 6222, no. August 1999, 2017.
- [163] A. W. Haas, “Design of a GaInP/GaAs tandem solar cell for maximum daily, monthly, and yearly energy output,” *J. Photonics Energy*, vol. 1, no. 1, p. 018001, 2011, doi: 10.1117/1.3633244.
- [164] S. Solar *et al.*, “Related content Surface Recombination Velocity in p-Type GaAs,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1994.
- [165] S. C. Jain and D. J. Roulston, “A simple expression for band gap narrowing (BGN) in heavily doped Si, Ge, GaAs and GexSi1-x strained layers,” *Solid State Electron.*, vol. 34, no. 5, pp. 453–465, 1991, doi: 10.1016/0038-1101(91)90149-S.
- [166] D. B. M. Klaassen and J. W. Slotboom, “Unified apparent bandgap narrowing in n- and p-type silicon.pdf,” vol. 35, no. 2, pp. 125–129, 1992.
- [167] S. Heckelmann, D. Lackner, C. Karcher, F. Dimroth, and A. W. Bett, “Investigations on Al_xGa_{1-x}As solar cells grown by MOVPE,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 5, no. 1, pp. 446–453, 2015, doi: 10.1109/JPHOTOV.2014.2367869.
- [168] S. A. Stockman *et al.*, “Oxygen incorporation in AlInP, and its effect on P-type doping with magnesium,” *J. Electron. Mater.*, vol. 28, no. 7, pp. 916–925, 1999, doi: 10.1007/s11664-999-0220-x.
- [169] C. M. Wolff, P. Caprioglio, M. Stollerfoht, and D. Neher, “Nonradiative Recombination in Perovskite Solar Cells: The Role of Interfaces,” *Adv. Mater.*, vol. 31, no. 52, 2019, doi: 10.1002/adma.201902762.
- [170] W. Guter and A. W. Bett, “I-V characterization of tunnel diodes and multijunction solar cells,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 53, no. 9, pp. 2216–2222, 2006, doi: 10.1109/TED.2006.881051.
- [171] P. Caprioglio *et al.*, “On the Relation between the Open-Circuit Voltage and Quasi-Fermi Level Splitting in Efficient Perovskite Solar Cells,” 2019, doi: 10.1002/aenm.201901631.
- [172] M. A. Green *et al.*, “Solar cell efficiency tables (Version 53),” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 27, no. 1, pp. 3–12, 2019, doi: 10.1002/pip.3102.
- [173] and C. A. I. García, I. Rey-Stolle, B. Galiana, “A 32.6% efficient lattice-matched dual-junction solar cell working at 1000 suns,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 053509, no. January, pp. 2007–2010, 2009, doi: 10.1063/1.3078817.
- [174] S. Michael, D. Bates, and J. Utsler, “The Design of Advanced Multi-Junction Solar Cells

Using Genetic Algorithm for the Optimization of a SILVACO Novel Cell Model The Design of Advanced Multi-Junction Solar Cells Using Genetic Algorithm for the Optimization of a SILVACO ® Novel Cell Model .,” *IEEE*, 2006.

- [175] K. Araki and M. Yamaguchi, “Influences of spectrum change to 3-junction concentrator cells,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 75, no. 3–4, pp. 707–714, 2003, doi: 10.1016/S0927-0248(02)00140-X.
- [176] P. Faine, S. R. Kurtz, C. Riordan, and J. M. Olson, “The influence of spectral solar irradiance variations on the performance of selected single-junction and multijunction solar cells,” *Sol. Cells*, vol. 31, no. 3, pp. 259–278, 1991, doi: 10.1016/0379-6787(91)90027-M.